



หลักการสื่อสาร

รองศาสตราจารย์ ดร. ปุณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์



KMITL-NICT

Prachomklao Chumphon
Radar Station

Operational Opening Day
17 January, 2020



แบบจำลองการสื่อสาร สัญญาณและระบบ อนุกรมพริเยร์ การแปลงพริเยร์
การมอดูเลต การดีมอดูเลต เทคโนโลยีการสื่อสาร ชั้นบรรยากาศ อุปกรณ์ตรวจจับ
สภาพอวกาศ ความผิดปกติและการทำนายสภาพอวกาศ และ ตัวอย่างโปรแกรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon, Chumphon

หลักการสื่อสาร

หลักการสื่อสาร

Principles of Communications

รองศาสตราจารย์ ดร. ปุณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์

ราคา 300 บาท

สงวนลิขสิทธิ์ © พ.ศ. 2565 โดยปุณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์
ห้ามลอกเลียนไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้
นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร

ISBN (e-book): 978-616-08-4619-1

จัดจำหน่ายโดย

บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน)

1858/87-90 ถนนเทพรัตน แขวงบางนาใต้

เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

โทร. (02) 826-8000

แฟกซ์ (02) 826-8999

URL. www.se-ed.com

คำนำ

ตำราเล่มนี้ จัดทำขึ้นสำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอนในรายวิชา หลักการสื่อสาร ของสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมสารสนเทศ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ ซึ่งผู้เขียนได้ใช้ประสบการณ์ในการสอนวิชาดังกล่าวมากกว่า 10 ปี และได้ใช้องค์ความรู้ที่ได้รับจากการทำวิจัย ในการเรียบเรียงตำราเล่มนี้และสอดแทรกผลงานวิจัยของตนเองลงในเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง โดยผู้เขียนได้เน้นการบรรยายที่ใช้ข้อความที่กระชับ เข้าใจง่าย ยกตัวอย่างประกอบคำบรรยาย พร้อมทั้งมีตัวอย่างการเขียนโปรแกรม เพื่อให้นักศึกษา ผู้อ่านและผู้สนใจสามารถเข้าใจเนื้อหาหลักการสื่อสารได้อย่างถ่องแท้ สามารถนำไปใช้เป็นความรู้พื้นฐานเพื่อเรียนวิชาต่อไปในสาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าได้ รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้องค์ความรู้ที่ได้รับจากตำราเล่มนี้ในการทำวิจัย และทำงานที่เกี่ยวข้องได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตำราเล่มนี้ได้นำเสนอองค์ความรู้ของวิชาหลักการสื่อสารสำหรับวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ครอบคลุมองค์ความรู้ล่าสุดของสภาวิศวกรใน ปี พ.ศ. 2565 อีกทั้งยังเป็นตำราเล่มแรกของประเทศไทยที่นำเสนอความรู้พื้นฐานและผลงานวิจัยทางด้านอวกาศ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการนำความรู้พื้นฐานของหลักการสื่อสารและเทคโนโลยีสื่อสารไปใช้งานในทางปฏิบัติได้อย่างเป็นรูปธรรม

เนื้อหาในตำราเล่มนี้ เริ่มต้นอธิบายตั้งแต่แบบจำลองการสื่อสาร สัญญาณและระบบ สเปกตรัมของสัญญาณ อนุกรมฟูรีเยร์ การแปลงฟูรีเยร์ ความน่าจะเป็นและตัวแปรสุ่ม การมอดูเลตและการดีมอดูเลตแบบแอนะล็อก การมอดูเลตและการดีมอดูเลตแบบดิจิทัล เครือข่ายการสื่อสารกับแบบจำลองโอเอสไอ เทคโนโลยีการสื่อสาร พารามิเตอร์และแบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์ การสปีคินและการประมวลผลข้อมูลด้านอวกาศ พารามิเตอร์ที่บ่งชี้สภาวะการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์และเว็บไซต์ที่เกี่ยวข้อง การทำนายสภาพอวกาศ ความผิดปกติสภาพอวกาศและผลกระทบที่เกิดขึ้น รวมถึงการปรับปรุงการระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ที่แม่นยำขึ้น

ผู้เขียนหวังว่า ตำราเล่มนี้จะให้ความรู้อันเป็นประโยชน์แก่นักศึกษา ผู้อ่านและผู้สนใจ ด้านหลักการสื่อสาร สภาพอวกาศ และหัวข้องานด้านอื่นที่เกี่ยวข้อง ถ้าตำราเล่มนี้มีจุดผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขอรับผิดชอบ และขอน้อมรับคำแนะนำ เพื่อนำมาปรับปรุงตำราเล่มนี้ให้ดีขึ้น สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ครูบาอาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้เขียน เพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการทางด้านอวกาศ ตลอดจนนักศึกษาที่ให้ข้อมูลสำหรับการปรับปรุงตำราเล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณทุก ๆ คนในครอบครัวที่ให้เวลาและให้กำลังใจในการเขียนตำราเล่มนี้ จนเสร็จจุล่งไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. ปุณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์
กรกฎาคม 2565

สารบัญ

หน้า

คำนำ.....	ก
สารบัญ.....	ข
บทที่ 1 บทนำหลักการสื่อสาร.....	1
1.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า.....	1
1.2 ประเภทของแหล่งกำเนิดข่าวสาร.....	3
1.3 ช่องสัญญาณการสื่อสาร.....	4
1.4 สัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล.....	6
1.5 ความสำคัญของการมอดูเลตและสายอากาศ.....	9
1.6 พารามิเตอร์บอกสมรรถนะของระบบ.....	10
1.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของช่องสื่อสาร.....	11
1.8 วิวัฒนาการของอุปกรณ์และวิธีการต่าง ๆ ในระบบการสื่อสาร.....	13
1.9 สรุปเนื้อหาบทที่ 1.....	15
1.10 คำถามท้ายบทที่ 1.....	15
บทที่ 2 พื้นฐานของสัญญาณและระบบ.....	17
2.1 ประเภทของสัญญาณ.....	17
2.2 ตัวอย่างของสัญญาณที่สำคัญในระบบสื่อสาร.....	23
2.3 ประเภทของระบบ.....	26
2.4 ผลตอบสนองอิมพัลส์.....	28
2.5 ระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาและที่ต่อเนื่องทางเวลา.....	28
2.6 สรุปเนื้อหาบทที่ 2.....	33
2.7 คำถามท้ายบทที่ 2.....	33
บทที่ 3 อนุกรมฟูรีเยร์และการแปลงฟูรีเยร์.....	35
3.1 การแสดงสเปกตรัมของสัญญาณ.....	35
3.2 อนุกรมฟูรีเยร์.....	37
3.3 การแปลงฟูรีเยร์.....	43
3.4 ทฤษฎีบทพลังงานเรย์ลี.....	50
3.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ.....	53
3.6 สรุปเนื้อหาบทที่ 3.....	55
3.7 คำถามท้ายบทที่ 3.....	55

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 4 ความน่าจะเป็นและตัวแปรสุ่ม	57
4.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับความน่าจะเป็น.....	57
4.2 ตัวแปรสุ่ม.....	66
4.3 พื้นฐานกระบวนการสุ่ม.....	72
4.4 บทสรุปบทที่ 4.....	79
4.5 คำถามท้ายบทที่ 4.....	79
บทที่ 5 การมอดูเลตเชิงขนาด	81
5.1 บทนำการมอดูเลต.....	81
5.2 การมอดูเลตเชิงขนาดแบบพื้นฐาน.....	82
5.3 การมอดูเลตแบบ DSB-SC.....	88
5.4 การมอดูเลตแบบ SSB.....	91
5.5 การดีมอดูเลตสัญญาณ SSB.....	93
5.6 ตัวมอดูเลตเชิงขนาดและตัวดีมอดูเลตเชิงขนาด.....	94
5.7 การมัลติเพลกซ์สัญญาณ.....	97
5.8 สรุปเนื้อหาบทที่ 5.....	100
5.9 คำถามท้ายบทที่ 5.....	100
บทที่ 6 การมอดูเลตเชิงมุม	101
6.1 การมอดูเลตเชิงมุม.....	101
6.2 การมอดูเลตเชิงมุมสเปกตรัมแคบ.....	104
6.3 แบนด์วิดท์ของคลื่น FM.....	106
6.4 คุณลักษณะสเปกตรัมของสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตเชิงมุม.....	106
6.5 ค่ากำลังงานเฉลี่ยของคลื่น FM.....	112
6.6 การสร้างตัวมอดูเลตเชิงมุม.....	112
6.7 การสร้างตัวดีมอดูเลตเชิงมุม.....	115
6.8 การมอดูเลตเชิงเฟส.....	119
6.9 สรุปเนื้อหาบทที่ 6.....	120
6.10 คำถามท้ายบทที่ 6.....	121
บทที่ 7 การมอดูเลตรหัสพัลส์	123
7.1 การชักตัวอย่าง.....	123
7.2 การแจกหน่วย.....	129
7.3 การเข้ารหัสพีซีเอ็ม (PCM encoding).....	135

สารบัญ

	หน้า
7.4 การมอดูเลตรหัสพัลส์แบบขั้นสูง.....	137
7.5 สรุปเนื้อหาบทที่ 7.....	138
7.6 คำถามท้ายบทที่ 7.....	139
บทที่ 8 การมอดูเลตสัญญาณแบบดิจิทัล.....	141
8.1 ความจุช่องสัญญาณ AWGN.....	142
8.2 การมอดูเลตสัญญาณผ่านแถบแบบ ASK.....	145
8.3 การมอดูเลตสัญญาณผ่านแถบแบบ FSK.....	147
8.4 การมอดูเลตสัญญาณผ่านแถบแบบ M-ary PSK.....	149
8.5 สมรรถนะของการมอดูเลตแบบดิจิทัล.....	158
8.6 สรุปเนื้อหาบทที่ 8.....	163
8.7 คำถามท้ายบทที่ 8.....	163
บทที่ 9 เครือข่ายการสื่อสารกับแบบจำลอง OSI.....	165
9.1 ประวัติความเป็นมาของระบบโทรคมนาคม.....	165
9.2 ความหมายของเครือข่าย.....	166
9.3 เครือข่ายโทรศัพท์สาธารณะ.....	167
9.4 เครือข่ายคอมพิวเตอร์.....	168
9.5 เครือข่ายไร้สายเฉพาะบริเวณ (WLAN).....	170
9.6 อินเทอร์เน็ตและแบบจำลอง OSI.....	177
9.7 การสื่อสารผ่านดาวเทียม.....	180
9.8 การสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง.....	185
9.9 สรุปเนื้อหาบทที่ 9.....	199
9.10 คำถามท้ายบทที่ 9.....	199
บทที่ 10 เทคโนโลยีการสื่อสาร.....	201
10.1 การมัลติเพล็กซ์แบบโอเอฟดีเอ็ม.....	201
10.2 ระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ยุคที่ 3 - ยุคที่ 5.....	205
10.3 เทคโนโลยีระบบดาวเทียมนำทางสากล.....	209
10.4 เทคนิค real-time kinematic (RTK).....	214
10.5 การระบุตำแหน่งที่อาศัยเทคโนโลยี 5G.....	217
10.6 สรุปเนื้อหาบทที่ 10.....	226
10.7 คำถามท้ายบทที่ 10.....	226

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 11 พารามิเตอร์และแบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์	227
11.1 ชั้นบรรยากาศ.....	227
11.2 อุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณความถี่วิทยุเพื่อตรวจวัดชั้นบรรยากาศ.....	230
11.4 สถานีชุมพรมกับอุปกรณ์ตรวจวัดชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	238
11.5 แบบจำลองชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	240
11.6 พารามิเตอร์ของชั้นไอโอโนสเฟียร์กับการคำนวณ.....	245
11.7 สรุปเนื้อหาบทที่ 11.....	251
11.8 คำถามท้ายบทที่ 11.....	251
บทที่ 12 การสืบค้นและการประมวลผลข้อมูลด้านอวกาศ	253
12.1 Digisonde และเว็บไซต์ GIRO.....	253
12.2 เว็บไซต์ DIBASE.....	260
12.3 การสืบค้นและการประมวลผลข้อมูลแบบจำลอง IRI-2016.....	261
12.4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยค่า B0 ของโลก.....	265
12.5 เครือข่าย International GNSS Service กับ VTEC maps.....	273
12.6 การประยุกต์ใช้งานค่า B0 ที่ได้จาก GIRO ร่วมกับค่า VTEC ที่ได้จาก IGS.....	278
12.7 สรุปเนื้อหาบทที่ 12.....	279
12.8 คำถามท้ายบทที่ 12.....	280
บทที่ 13 พารามิเตอร์และการทำนายสภาพอวกาศ	281
13.1 พารามิเตอร์ตัวที่ 1 - ค่าพายุสนามแม่เหล็ก (Kp index).....	281
13.2 พารามิเตอร์ตัวที่ 2 - ค่าพายุรังสีสุริยะ (solar radiation storm).....	284
13.3 พารามิเตอร์ตัวที่ 3 - ค่าการขาดหายของสัญญาณวิทยุ (radio blackout).....	286
13.4 พารามิเตอร์ตัวที่ 4 - ค่า Disturbance Storm Time (Dst index).....	289
13.5 พารามิเตอร์ตัวที่ 5-ค่า Planetary A-index (Ap).....	290
13.6 พารามิเตอร์ตัวที่ 6 - ค่าฟลักซ์สุริยะ F10.7.....	290
13.7 สรุปเว็บไซต์พารามิเตอร์ที่บ่งชี้สถานะการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	293
13.8 ตัวอย่างของเว็บไซต์ที่จัดทำพารามิเตอร์ที่บ่งชี้สถานะการเปลี่ยนแปลง ชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	294
13.9 การทำนายการเกิดขึ้นของพลาสมาบับเบิลด้วย Machine Learning.....	298
13.10 การทำนายการเกิดขึ้นของพลาสมาบับเบิลด้วยวิธี CNN.....	300
13.11 สรุปเนื้อหาบทที่ 13.....	303
13.12 คำถามท้ายบทที่ 13.....	303

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 14 ความผิดปกติสภาพอวกาศและผลกระทบที่เกิดขึ้น	305
14.1 พลาสมาบับเบิล.....	305
14.2 คุณลักษณะพื้นฐานของ EPB และซินทิลเลชันในชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	307
14.3 คุณลักษณะ EPB และซินทิลเลชันในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้.....	310
14.4 ประเด็นของ EPB และซินทิลเลชันที่ยังอธิบายไม่ได้และต้องการคำตอบ.....	313
14.5 การสังเกตการณ์ชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบคร่าวดีในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้.....	324
14.6 การสังเกต EPB, ความผิดปกติชั้นไอโอโนสเฟียร์และซินทิลเลชัน.....	328
14.7 การคำนวณค่าบ่งชี้ระดับความรุนแรงค่า ROT และค่า ROTI.....	330
14.8 สรุปเนื้อหาบทที่ 14.....	340
14.9 คำถามท้ายบทที่ 14.....	340
บทที่ 15 การปรับปรุงการระบุพิกัด RTK ที่แม่นยำขึ้น	343
15.1 การระบุพิกัดแบบเรียลไทม์ (RTK) ที่อาศัยเครื่องรับ GNSS.....	343
15.2 singular spectrum analysis.....	345
15.3 คาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter).....	351
15.4 วิธี Kalman Filter-Based Singular Spectrum Analysis (KF-SSA).....	352
15.5 ผลการศึกษาวิธี KF-SSA ที่นำเสนอ.....	355
15.6 การระบุพิกัดแบบ Network RTK ภายใต้พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่รุนแรง.....	358
15.7 วิธี Network RTK ร่วมกับคาลมานฟิลเตอร์เชิงเส้น.....	362
15.8 วิธี Network RTK ร่วมกับการพิจารณา PDOP และคาลมานฟิลเตอร์เชิงเส้น.....	371
15.9 สรุปเนื้อหาบทที่ 15.....	384
15.10 คำถามท้ายบทที่ 15.....	385
บรรณานุกรม	387
ดัชนีคำศัพท์	393
ประวัติผู้เขียน	401

บทที่ 1

บทนำหลักการสื่อสาร

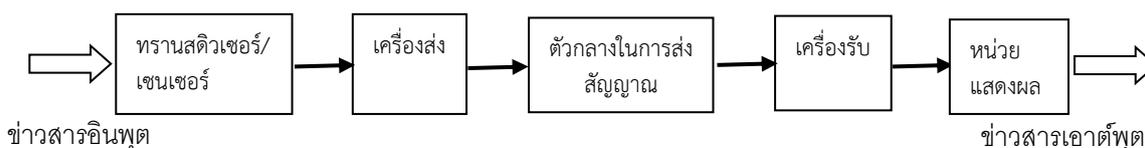
ผลการเรียนรู้ที่คาดหวังของบทที่ 1

- เข้าใจและอธิบายบล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า
- รู้จักประเภทของแหล่งกำเนิดข่าวสารและช่องสัญญาณการสื่อสาร
- เข้าใจและสามารถอธิบายพารามิเตอร์บอกสมรรถนะของระบบได้
- เข้าใจและอธิบายการใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของช่องสัญญาณสื่อสารได้

การติดต่อสื่อสาร (communication) คือความต้องการพื้นฐานของมนุษย์ที่มีการส่งข้อความหรือข่าวสาร (information) ได้แก่ เสียง วิดีโอ ภาพนิ่ง หรือข้อความ ฯลฯ จากแหล่งกำเนิดข่าวสาร (source) ไปยังผู้รับปลายทาง (destination หรือ sink) ถ้าการติดต่อดังกล่าวมีการใช้สัญญาณไฟฟ้าเป็นหลักในการสื่อสาร เราจึงเรียกว่า ระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า โดยเนื้อหาในบทที่ 1 นี้จะอธิบายหัวข้อพื้นฐานที่สำคัญสำหรับระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า ได้แก่ บล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า ประเภทของแหล่งกำเนิดข่าวสาร ช่องสัญญาณการสื่อสาร สัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล การมอดูเลตกับสายอากาศ พารามิเตอร์บอกสมรรถนะของระบบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับช่องสัญญาณ และวิวัฒนาการของระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า รายละเอียดของแต่ละหัวข้อมีดังนี้

1.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า

บล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้ามีแสดงไว้ในรูปที่ 1.1 จากรูป ชื่ออุปกรณ์ หน้าที่ และคำจำกัดความของส่วนประกอบต่าง ๆ มีดังนี้



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า

1) ทรานสดิวเซอร์ (transducer) เป็นอุปกรณ์อินพุต (input device) ที่ใช้ในการเปลี่ยนข่าวสารให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อที่จะส่งเข้าไปในระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า ซึ่งถูกจัดว่าเป็นแหล่งกำเนิดข่าวสารประเภทหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่น ข่าวสารที่อยู่ในรูปของสัญญาณเสียงพูด ตัวทรานสดิวเซอร์อาจเป็นไมโครโฟน ข่าวสารที่อยู่ในรูปของรูปภาพ ตัวทรานสดิวเซอร์อาจเป็นกล้องถ่ายรูป เป็นต้น โดยระดับสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแปรผันโดยตรงกับข่าวสาร (สัญญาณทางกายภาพ) เช่น ถ้าเสียงพูดมีระดับที่ดัง ขนาด (amplitude) ของสัญญาณไฟฟ้าที่แปลงได้จากไมโครโฟนก็มีค่าสูงตามไปด้วย ฯลฯ

ในทางปฏิบัติ เราอาจจะใช้เซนเซอร์ (sensor) เป็นแหล่งกำเนิดข่าวสารก็ได้ โดยเซนเซอร์จัดเป็นอุปกรณ์อินพุตที่ใช้ในการเปลี่ยนข่าวสารให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเช่นเดียวกับทรานสดิวเซอร์ แต่อาศัยการ

เปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าความต้านทาน ค่าความจุไฟฟ้า ฯลฯ ที่แปรผันโดยตรงกับ
ข่าวสาร เช่น เทอร์มิสเตอร์ ที่ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ตรวจวัด เป็นต้น

2) เครื่องส่ง (transmitter) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดการกับสัญญาณที่เป็นตัวแทนของข่าวสาร
หรือข้อมูล ให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมในการส่งเข้าไปในตัวกลาง (media) หรือช่องสัญญาณ (channel) และ
บรรลូវัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ในระบบการสื่อสาร เช่น การมอดูเลต (modulation) เพื่อให้ส่งสัญญาณออก
สายอากาศและส่งไปได้ไกล หรือแม้กระทั่ง การเข้ารหัสข้อมูล (encoding) เพื่อลดอัตราความผิดพลาดบิตใน
การส่งข้อมูล เป็นต้น

3) ช่องสัญญาณ (channel) เป็นตัวกลางที่ใช้ในการส่งสัญญาณจากต้นทาง (source) ไปยัง
ปลายทาง (destination) ซึ่งถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ

3.1) *ตัวกลางแบบใช้สาย (wired media)* เป็นตัวกลางแบบที่ใช้สายนำสัญญาณในการส่ง
สัญญาณ ได้แก่ สายคู่ตีเกลียว สายแกนร่วม เส้นใยนำแสง

3.2) *ตัวกลางแบบไม่ใช้สาย (wireless media)* เป็นตัวกลางแบบใช้อากาศ (ไม่ใช้สายนำ
สัญญาณ) ในการส่งสัญญาณ ซึ่งมีการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากสายอากาศ

คุณลักษณะที่สำคัญของช่องสัญญาณ คือ

ก) ในกรณีของสายนำสัญญาณ การลดทอน (attenuation) เกิดจากการสูญเสียทาง
ไฟฟ้า เนื่องจากองค์ประกอบของสายนำสัญญาณเป็นอุปกรณ์จำพวก RLC สัญญาณที่ส่งจึงมี
ค่ากำลังไฟฟ้าที่ลดลงเรื่อย ๆ เมื่อระยะทางที่ส่งไกลขึ้น

ข) อาจจะถูกรบกวนหรือแทรกสอดจากสัญญาณที่มาจากช่องสัญญาณอื่นได้ ทำให้
สัญญาณที่ส่งไปอาจเกิดความผิดพลาดได้

4) เครื่องรับสัญญาณ (receiver) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดการกับสัญญาณที่รับเข้ามาจาก
ช่องสัญญาณ โดยอาจจะมีขยายขนาดสัญญาณ (amplifier) การดีมอดูเลต (demodulation) และการ
ถอดรหัสข้อมูล (decoding) เพื่อให้ได้สัญญาณหรือข่าวสารที่เหมือนเดิมออกมา

5) หน่วยแสดงผล (display unit) หรืออุปกรณ์เอาต์พุต (output device) ของผู้รับปลายทาง ซึ่ง
ทำหน้าที่แสดงผลข้อมูลหรือข่าวสารที่ได้จากวงจรตรวจหา (detector) และวงจรถอดรหัส (decoder) ของ
เครื่องรับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าประมาณ (estimate) ของข่าวสารต้นฉบับที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดข่าวสาร

ในที่นี้ มีคำศัพท์ที่จะต้องรู้ควบคู่กับบล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า ได้แก่

- 1) ข่าวสาร (information) คือ สิ่งที่ผู้ส่งหรือแหล่งกำเนิดต้องการส่งให้ผู้รับเข้าใจ
ความหมายตามที่ต้องการในลักษณะเป็นนามธรรมหรืออาจจะเรียกว่าสัญญาณทาง
กายภาพ เช่น ค่าอุณหภูมิ ค่าความชื้น ฯลฯ (ในที่นี้ information ไม่ใช่สารสนเทศ)
- 2) ข้อมูล (data) เป็นตัวแทนของข่าวสารเพื่อให้ผู้รับสามารถจัดเก็บ ประมวลผลและ
นำไปแสดงผลในลักษณะเป็นรูปธรรมของข่าวสาร
- 3) สัญญาณ (signal) เป็นการแทนข้อมูลด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่จาก
ต้นทางไปยังปลายทางได้ตามต้องการ

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างของบล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า

องค์ประกอบ	อุปกรณ์	หน้าที่/การทำงาน
ทรานสดิวเซอร์/เซนเซอร์ (อุปกรณ์อินพุต)	เซนเซอร์ DHT-21	วัดค่าอุณหภูมิและความชื้น
เครื่องส่ง	NodeMCU ESP8266	ส่งค่าอุณหภูมิและความชื้นในรูปแบบสัญญาณดิจิทัลออกทางสายอากาศ
ตัวกลางส่งสัญญาณ	อากาศ	
เครื่องรับ	คอมพิวเตอร์ปลายทาง	รับสัญญาณดิจิทัลมาจากสายอากาศ และส่งไปที่พอร์ตอนุกรม (serial port)
หน่วยแสดงผล (อุปกรณ์เอาต์พุต)	จอมอนิเตอร์	แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นบนหน้าเว็บไซต์ที่ออกแบบไว้หรือบนฐานข้อมูล Firebase (Google Cloud) ที่กำหนดไว้
คำศัพท์	รูปแบบของการทำงาน/การประมวลผล	
อุปกรณ์ต่าง ๆ ทางต้นทาง		
ข่าวสาร	ค่าอุณหภูมิและความชื้นที่เซนเซอร์ DHT-21 อ่านค่าได้	
ข้อมูล	ค่าอุณหภูมิและความชื้นที่ NodeMCU ESP8266 ได้รับจากเซนเซอร์ ในที่นี้ อาจจัดเก็บข้อมูลในหน่วยความจำชั่วคราว หรือ SD-Card ด้วยก็ได้	
สัญญาณ	สัญญาณดิจิทัลที่แทนค่าอุณหภูมิและความชื้นแล้วส่งออกสายอากาศ เช่น บิต 0 แทนระดับสัญญาณ 0 โวลต์ กับ บิต 1 แทนระดับสัญญาณ 5 โวลต์	
อุปกรณ์ต่าง ๆ ทางปลายทาง		
สัญญาณ	สัญญาณดิจิทัลที่รับได้จากสายอากาศ	
ข้อมูล	บิตข้อมูลที่ถูกนำไปแสดงผลและเก็บไว้ที่บัฟเฟอร์ (หน่วยความจำหรือที่ปักข้อมูลชั่วคราว) ของพอร์ตอนุกรม	
ข่าวสาร	ค่าอุณหภูมิและความชื้นที่นำไปแสดงผลบนหน้าเว็บไซต์หรือบน Firebase	

ตัวอย่างของระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า ได้แก่

ก) การนำค่าอุณหภูมิและความชื้นจากสวนปลูกองุ่นไปแสดงบนหน้าเว็บไซต์ผ่านเครือข่ายสื่อสารไร้สายท้องถิ่น (wireless local area network หรือ WiFi)

ข) ระบบวิทยุกระจายเสียงเอฟเอ็ม (FM broadcasting system)

ค) การส่งข้อความผ่านโปรแกรมไลน์จากโทรศัพท์มือถือไปยังคอมพิวเตอร์ปลายทาง

ในที่นี้ จะขอยกตัวอย่างรายละเอียดขององค์ประกอบและคำศัพท์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกรณี ก) เท่านั้นดังแสดงในตารางที่ 1.1 เพื่อให้เห็นภาพของบล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า

1.2 ประเภทของแหล่งกำเนิดข่าวสาร

ข้อมูลที่ถูกส่งผ่านในระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้าถูกแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่

1. เสียงพูด (voice) – จากทดลองส่งสัญญาณเสียงพูดคนผ่านสายนำสัญญาณ พบว่า พลังงานของเสียงพูดคนโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในย่านความถี่ (band) ตั้งแต่ 300 Hz – 3,400 Hz (3.4 kHz)

2. เสียงเพลงหรือออดิโอ (music หรือ audio) เป็นสัญญาณที่มีทั้งเสียงทุ้มและเสียงแหลมที่ต้องการใช้แถบกว้างความถี่ (bandwidth) ที่มากกว่าเสียงพูด ดังนั้น อาจจะมีย่านความถี่สูงถึง 15 kHz ซึ่งโดยทั่วไปเสียงเพลงหรือออดิโอมักถูกบันทึกไว้ในรูปแบบบิตดิจิทัลในหน่วยความจำหรือแผ่นดิสก์ แล้วถูกส่ง (play) ออกทางลำโพง

3. ภาพนิ่ง (image) เป็นภาพถ่ายทั่วไปที่ไม่มีการเคลื่อนไหว โดยขนาดของภาพหนึ่งมีค่าแตกต่างกันตามวิธีการบีบอัดข้อมูล (compression) และความละเอียดของภาพ (resolution) ระดับหลายร้อย kHz เช่น jpg, bmp, png, gif เป็นต้น

4. สัญญาณวิดีโอ (video) เป็นภาพเคลื่อนไหวที่ต้องใช้หน่วยความจำและแถบกว้างความถี่ที่สูงมาก ระดับหลาย MHz โดยไฟล์วิดีโอมีค่าแตกต่างกันตามวิธีการบีบอัดข้อมูล (compression) และความละเอียดของภาพ (resolution) เช่นเดียวกับภาพนิ่ง เช่น AVI, MPEG-4, DAT, WMV เป็นต้น

5. ข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ เป็นรหัสไบนารีที่ประกอบไปด้วยบิต 0 กับบิต 1 ที่ไม่ผ่านการมอดูเลต ซึ่งถูกเรียกว่า baseband signal โดยคุณลักษณะในการส่งขบวนบิตข้อมูลเป็นแบบเบิร์สต์ (burst) กล่าวคือ มีการส่งสัญญาณออกไปเป็นช่วง ๆ (สภาวะ On) สลับกับช่วงเงียบที่ไม่มีการส่งสัญญาณใด ๆ (สภาวะ Off) ออกไป

สืบเนื่องจากข้อมูลจากคอมพิวเตอร์โดยทั่วไปเป็นข้อมูลดิจิทัล ดังนั้นเราจึงเอาวิธีบีบอัดข้อมูลมาลดขนาดของข้อมูลเพื่อประหยัดพื้นที่ในการจัดเก็บและเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลได้ โดยการบีบอัดข้อมูลแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ

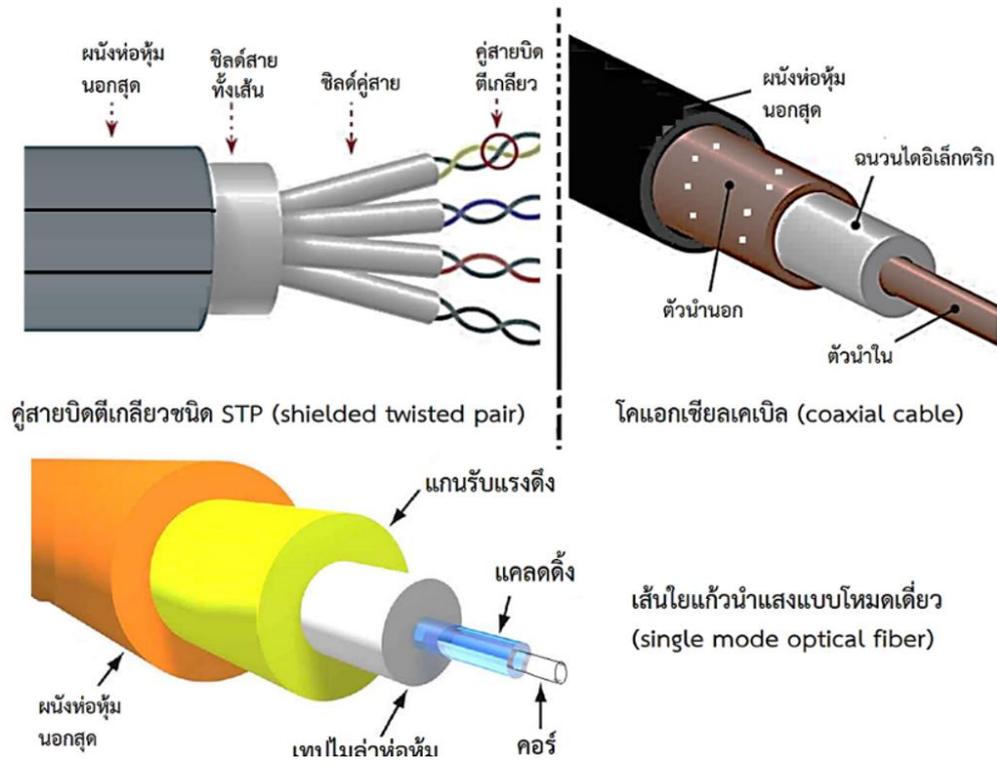
ก) การบีบอัดแบบไม่มีการสูญเสีย (lossless compression) หรือ การเข้ารหัสแบบเอนโทรปี (entropy encoding) – เทคนิคนี้ถูกนำไปใช้กับข้อมูลประเภทข้อความ (text) หรือข้อมูลคอมพิวเตอร์ที่มีความสำคัญ ที่ซึ่งมีความต้องการที่จะกู้ข้อมูลคืนกลับมาที่เครื่องรับได้ครบถ้วนสมบูรณ์ ได้แก่ Huffman, Lempel-Ziv ฯลฯ

ข) การบีบอัดแบบที่ยอมให้มีการสูญเสีย (loss compression) – เทคนิคนี้ถูกนำไปใช้ในการบีบอัดสัญญาณวิดีโอและออดิโอ (เช่น มาตรฐาน ITU H.264, MPEG-4) และภาพนิ่ง (เช่น วิธี jpg, bmp) เพื่อรับส่งข้อมูลในระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้าที่ต้องการ

1.3 ช่องสัญญาณการสื่อสาร

ช่องสัญญาณสำหรับการติดต่อสื่อสารนั้นถูกจำแนกออกได้หลายช่องทางตามประเภทของตัวกลางแบบใช้สายกับแบบไม่ใช้สาย ดังนี้

1. สายคู่ตีเกลียว (twisted pair) เป็นสายทองแดง 2 เส้นที่นำตีเกลียวกันเพื่อลด cross talk ที่เกิดขึ้นระหว่างการส่งสัญญาณ แรกเริ่ม สายคู่ตีเกลียวนี้ใช้สำหรับส่งเสียงพูดในการสื่อสารโทรศัพท์ตามบ้านเท่านั้น ด้วยอัตราการส่งข้อมูลเพียงหลายร้อย kHz มีการลดทอนสัญญาณในช่วงความถี่ 300 Hz – 3.4 kHz และมีความต้านทานสายประมาณ 90-100 โอห์ม ทั้งนี้ สายคู่ตีเกลียวแบบไม่มีชีลด์หุ้มด้านนอก มีแต่วัสดุ PVC เคลือบตัวนำเท่านั้น ถูกเรียกว่า สาย unshielded twisted pair (สาย UTP) โดยสายเคเบิล UTP นี้ได้รับความนิยมสำหรับส่งข้อมูลในเครือข่ายพื้นที่ท้องถิ่น (LAN) หรืออีเทอร์เน็ต (Ethernet) ความเร็วสูง ได้แก่ cat5, cat6, cat7 เป็นต้น โดยแต่ละประเภทมีคุณสมบัติในการใช้งาน ระยะทางส่งข้อมูลและอัตราการรับส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ สายคู่ตีเกลียวยังมีอีกประเภทหนึ่งคือสาย shielded twisted pair (สาย STP) ซึ่งมีความสามารถในการส่งข้อมูลที่ดีกว่าสาย UTP แต่มีราคาแพงกว่า



รูปที่ 1.2 ตัวกลางแบบใช้สาย

ตารางที่ 1.2 แบนด์วิดท์ ค่าการลดทอน ค่าหน่วงเวลา, อัตราการส่งข้อมูลของสายนำสัญญาณ [78]

ชนิดของตัวกลาง	แบนด์วิดท์/ ความถี่ใช้งาน	ค่าการลดทอน / ค่าหน่วงเวลา / ระยะทางรีพีตเตอร์	แบนด์วิดท์ ที่กำลังพัฒนา	อัตราการ ส่งข้อมูล	ประเภท ของสาย คู่ตีเกลียว
สายคู่ตีเกลียว	10 - 100 Mbps / 0 - 3.5 kHz	0.2 dB/km @ 1 kHz / 50 μ s/km / 2 km			
cat 5e (1000Base-T)			100 MHz (up to 350 MHz)	1000 Mbps	UTP หรือ STP
cat 6 (1000Base-T)			250 MHz (up to 350 MHz)	1000 Mbps	UTP หรือ STP
cat 6e (10GBase-T)			500 MHz (up to 550 MHz)	10 Gbps	UTP หรือ STP
cat 7 (10GBase-T)			600 MHz	10 Gbps	STP Only
cat 8 (25GBase- T ถึง 40GBase-T)			2,000 MHz	up to 40 Gbps	STP only
สายโคแอกเซียล	10 Mbps / 0 - 500 MHz	7 dB/km@10 MHz / 4 μ s/km / 1 - 9 km			
เส้นใยนำแสง	0.1 - 1 Gbps / 186 - 370 THz	0.2 - 0.5 dB/km / 5 μ s/km / 40 km			

2. สายโคแอกเซียล (coaxial cable) หรือสายแกนร่วม เป็นสายนำสัญญาณที่มีตัวนำโลหะ 2 ชั้น ที่เรียกว่า ตัวนำในกับตัวนำนอก มีฉนวนหุ้มด้านนอก และมีวัสดุ PVC เคลือบอยู่ด้านนอกสุด จึงทำให้รองรับอัตราการส่งข้อมูลที่อัตราการส่งสูงกว่าสายคู่ตีเกลียว ด้วยอัตราการส่งข้อมูลประมาณ 100 MHz และมีค่าอิมพีแดนซ์อยู่ที่ค่า 50 โอห์ม (สายแกนร่วมแบบบาง) สำหรับการสื่อสารไมโครเวฟ กับค่า 75 โอห์ม (สายแกนร่วมแบบหนา) สำหรับระบบเคเบิลทีวี (cable TV) และระบบกล้องวงจรปิด (CCTV)

3. เส้นใยนำแสง (optical fiber) [1] ทำจากวัสดุโปร่งแสงรูปทรงกระบอกจำนวน 2 ชั้นที่ซ้อนกัน เรียกว่า คอร์ (core) กับเคลดดิ้ง (cladding) โดยค่าดัชนีหักเหของคอร์มีค่าที่สูงกว่าเคลดดิ้งประมาณ 0.2 – 3% (ยกตัวอย่างเช่น ค่าดัชนีหักเหของคอร์เท่ากับ 1.47 และค่าดัชนีหักเหของเคลดดิ้งเท่ากับ 1.45 เป็นต้น) ซึ่งรองรับการส่งข้อมูลด้วยคลื่นพาห่ย่านความถี่แสง (ระดับหลายร้อย THz) จึงทำให้มีแถบกว้างความถี่ที่กว้างมากและรองรับอัตราการส่งข้อมูลได้หลายร้อย Tbps อีกทั้งเส้นใยนำแสงมีค่าการลดทอนที่ต่ำมากและไม่ถูกรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภายนอก เนื่องจากเราใช้สัญญาณแสงในการข้อมูล

ตัวอย่างของเครือข่ายที่อาศัยช่องทางการสื่อสารแบบใช้สาย ได้แก่ เครือข่ายโทรศัพท์พื้นฐานตามบ้าน เครือข่ายคอมพิวเตอร์ เครือข่ายพื้นที่ท้องถิ่น เครือข่ายพื้นที่ระดับเมือง และเครือข่ายพื้นที่ระดับกว้าง เป็นต้น ทั้งนี้ รายละเอียดคุณสมบัติของสายนำสัญญาณต่าง ๆ ที่พิจารณาเพื่อเลือกใช้งานในทางปฏิบัติมีแสดงไว้ในตารางที่ 1.2 ได้แก่ แบนด์วิดท์ ความถี่ใช้งาน ค่าการลดทอน ค่าหน่วงเวลา ระยะห่างรีพีตเตอร์ แบนด์วิดท์ที่กำลังพัฒนา อัตราการส่งข้อมูล และประเภทของสายคู่ตีเกลียวที่ใช้งานในเครือข่าย LAN ที่แตกต่างกันของสายคู่ตีเกลียวประเภท Cat 5e - Cat 8 เช่น 1000BaseT, 10GBase-T เป็นต้น [78]

ตัวกลางแบบไม่ใช้สายนั้นคืออากาศและชั้นบรรยากาศของโลก ซึ่งเป็นการส่งข้อมูล (สัญญาณรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) ผ่านท่อนำคลื่น (waveguide) แล้วส่งออกจากสายอากาศ โดยสัญญาณข้อมูลต้องถูกนำมามอดูเลตกับคลื่นพาห่ในย่านความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ตัวอย่างของเครือข่ายที่อาศัยช่องทางการสื่อสารแบบไร้สาย ได้แก่ ระบบรับส่งคลื่นวิทยุ (AM, FM, HF-communication) ระบบแพร่ภาพโทรทัศน์ เครือข่ายสื่อสารย่านไมโครเวฟ เครือข่ายสื่อสารผ่านดาวเทียม เครือข่าย WiFi (Wireless Fidelity) เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G/5G ระบบระบุตำแหน่งสากล Global Positioning System (GPS) และระบบดาวเทียมนำทางสากล (Global Navigation Satellite System หรือ GNSS) เป็นต้น

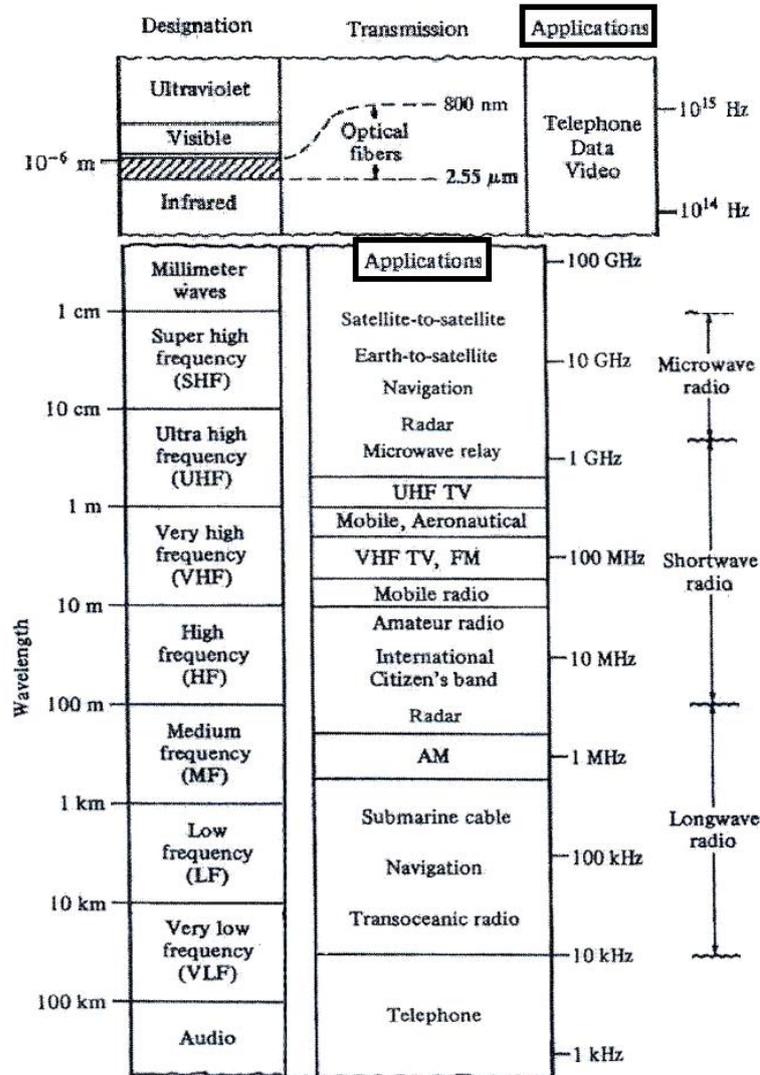
1.4 สัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล

ในโลกสื่อสารยุคปัจจุบันนี้ ข้อมูลที่เป็นตัวแทนของข่าวสารนั้นจะถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ตามประเภทของแหล่งกำเนิดข่าวสาร ได้แก่ สัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล

1) สัญญาณแอนะล็อก (analog signal) คือ สัญญาณที่มีแอมพลิจูดต่อเนื่องทางเวลา (continuous signal) ได้แก่ เสียงพูด ภาพเคลื่อนไหว เป็นต้น โดยค่าของสัญญาณแอนะล็อกจะเป็นเซตของจำนวนจริง ดังแสดงในรูปที่ 1.4 (บนซ้าย)

ในอดีต เราพบว่า การส่งสัญญาณแอนะล็อกมักจะถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนอยู่เสมอ มีวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนที่ซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและลงทุนที่สูง มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาวงจรสื่อสารแบบแอนะล็อกที่สูง อีกทั้งยังอาศัยการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกเชิงความถี่ (frequency division multiplexing: FDM) เท่านั้น ทำให้แถบความถี่ที่มีจำกัดไม่สามารถจะรองรับจำนวนผู้ใช้ที่มีจำนวนมากได้ (unscalability) การแก้ปัญหาที่สเปกตรัมความถี่มีจำกัดคือ นักวิจัยและวิศวกรจำนวนมากจึงได้เริ่มออกแบบและสร้างสัญญาณดิจิทัลขึ้นมา โดยนำสัญญาณแอนะล็อกมาซีกตัวอย่าง (sampling) โดยอาศัยทฤษฎีบทของไนควิสต์ (Nyquist's Theorem) และทำการเข้ารหัสข้อมูล แล้วนำเสนอมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกเชิงเวลา

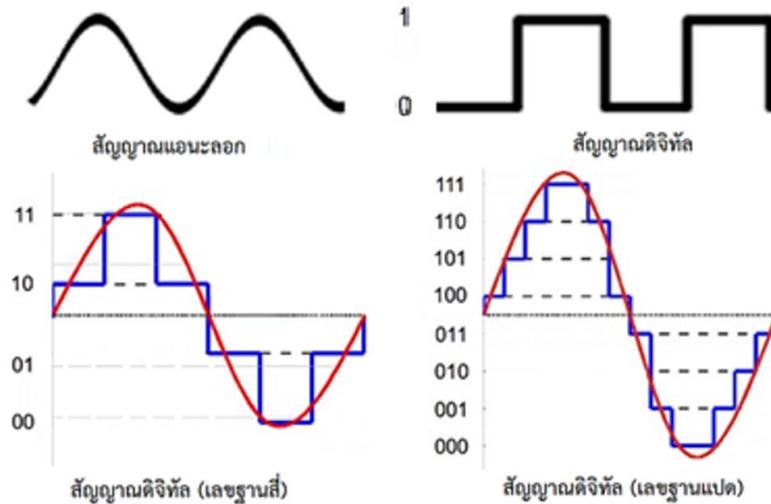
(time division multiplexing: TDM) และเชิงรหัส (code division multiplexing: CDM) รวมถึงเร่งพัฒนาเส้นใยนำแสงและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการสื่อสารด้วยแสงให้มีคุณภาพที่สูงขึ้น มีประสิทธิภาพที่ดี และมีค่าการสูญเสียกำลังแสงที่ต่ำ ซึ่งเป็นการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing: WDM) นอกจากนี้ มีแนวความคิดในการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ (frequency reuse) ในพื้นที่ที่ไกลออกไปและไม่เกิดการแทรกสอดกัน (interference)



รูปที่ 1.3 ย่านความถี่ต่าง ๆ ของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2) สัญญาณดิจิทัล (digital signal) คือ รหัสไบนารี (binary code) ซึ่งเป็นเลขฐานสอง (บิต 0 กับ บิต 1) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 (บนขวา) และมีสัญญาณหลายระดับ (multi-level signal) ซึ่งเป็นสัญญาณหลายระดับที่นำเลขฐานสองมาเป็นฐานในการสร้างชุดรหัส หรืออาจจะมองเป็นเลขฐานอื่น ๆ ที่เป็นคอมบินชันของเลขฐานสองก็ได้ เช่น เลขฐานสี่ เลขฐานแปด เลขฐานสิบหก ฯลฯ ดังแสดงในรูปที่ 1.4 (ล่าง)

หมายเหตุ บิต (bit) คือหน่วยข้อมูลที่เล็กที่สุดของข้อมูลดิจิทัล และไบต์ (byte) คือหน่วยข้อมูลที่นำบิตข้อมูลจำนวน 8 บิตมาเรียงต่อกัน ซึ่งโดยทั่วไป 1 ไบต์คือขนาดของตัวอักษร 1 ตัวและขนาดของหน่วยความจำ (เนื่องที่ในการเก็บข้อมูล)



รูปที่ 1.4 สัญญาณแอนะล็อก สัญญาณดิจิทัลในรูปเลขฐานสอง เลขฐานสี่ และเลขฐานแปด

ตัวอย่างของการใช้สัญญาณไบนารีในการแทนข้อมูล เช่น สมมติว่า ถ้าเราต้องการเก็บข้อมูลตัวอักษรทั้งหมด 52 ตัวอักษร {A, B, C,..., Z, a, b, c,..., z} แสดงว่า เราจะต้องใช้บิตข้อมูลดิจิทัลอย่างน้อย 6 บิต สำหรับการแทนค่าตัวอักษรทั้งหมด (เราสามารถแทนค่าได้ $2^6 - 1 = 63$ ตัวอักษร มีบิตข้อมูลจำนวน 6 หลัก) ยกตัวอย่างเช่น ตัว Z แทนด้วยเลขฐานสิบเท่ากับ 26 รหัสไบนารีคือ 011010 หรือตัวอักษร z แทนด้วยเลขฐานสิบเท่ากับ 52 รหัสไบนารีคือ 110100 เป็นต้น ข้อดีของสัญญาณไบนารีคือ การออกแบบและสร้างวงจรได้ง่ายและมีราคาถูก การบำรุงรักษาวงจรก็ได้ง่าย ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาและซ่อมบำรุงก็ต่ำ รวมถึงการกำจัดสัญญาณรบกวนก็ทำได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณแอนะล็อก

อีกตัวอย่างหนึ่งคือการใช้สัญญาณหลายระดับในการแทนข้อมูล เช่น สมมติว่า ถ้าเราต้องการเก็บข้อมูลตัวอักษรทั้งหมด 52 ตัวอักษร {A, B, C,..., Z, a, b, c,..., z} เช่นเดิมโดยอาศัยเลขฐานสี่ ค่าตัวเลข คือ {0, 1, 2, 3} หรือ {00, 01, 10, 11} แสดงว่า เราจะต้องใช้เลขฐานสี่อย่างน้อย 3 หลัก สำหรับการแทนค่าตัวอักษรทั้งหมด (เราสามารถแทนค่าได้ $4^3 - 1 = 63$ ตัวอักษร มีข้อมูลจำนวน 3 หลัก) ยกตัวอย่างเช่น ตัว Z แทนด้วยเลขฐานสิบเท่ากับ 26 เลขฐานสี่คือ 122 หรือตัวอักษร z แทนด้วยเลขฐานสิบเท่ากับ 52 เลขฐานสี่คือ 310 เป็นต้น ข้อดีของสัญญาณหลายระดับนั้นก็รวมข้อดีของสัญญาณไบนารีเข้าไปด้วย รวมถึงยังเป็นการประหยัดเนื้อที่ในการเก็บข้อมูลของหน่วยความจำและส่งข้อมูลได้รวดเร็ว แต่ข้อเสียคือ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทำงานร่วมกับสัญญาณหลายระดับก็มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ดังนั้น เราจึงนิยมนำสัญญาณหลายระดับไปใช้ในระบบการบันทึกข้อมูลของแผ่นดีวีดีและแผ่นซีดี รวมถึงวงจรเข้ารหัสดิจิทัลที่มีเข้ารหัสมากกว่า 1 บิตต่อ 1 สัญลักษณ์ (เช่น เข้ารหัส 2 บิตต่อ 1 สัญลักษณ์ นั่นคือวงจร 4 PSK ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทเรียนของการมอดูเลตแบบดิจิทัล)

ตัวอย่างอัตราการส่งข้อมูล ถ้าเราส่ง 1 บิตต่อ 1 สัญลักษณ์ (รหัสไบนารีพื้นฐาน) เราส่ง 8 บิตในเวลา 1 วินาที อัตราการส่งข้อมูล (bit rate) เท่ากับ 8 bps แต่ถ้าเราทำการเข้ารหัสโดยส่ง 2 บิตต่อ 1 สัญลักษณ์ เราจะส่งข้อมูลได้ถึง 16 บิตในเวลา 1 วินาที นั่นก็คือ อัตราการส่งข้อมูลมีค่าเท่ากับ 16 bps

1.5 ความสำคัญของการมอดูเลตและสายอากาศ

ข้อมูลที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดข่าวสารต่าง ๆ ไม่สามารถที่จะส่งผ่านสายนำสัญญาณไปได้ไกล เนื่องจากสายนำสัญญาณมีการสูญเสียทางไฟฟ้า ทำให้กำลังสัญญาณลดทอน ดังนั้น มีวิธีการแก้ไข 2 วิธีเพื่อให้สามารถส่งสัญญาณไปได้ไกล คือ

1. ใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier) หรืออุปกรณ์ทวนสัญญาณ (repeater) เป็นระยะ ๆ เพื่อให้สัญญาณมีขนาดที่สูงขึ้นและส่งไปได้ไกล โดยเราสามารถพิจารณาได้จากค่า Repeater/Amplifier Spacing คือ ระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ/อุปกรณ์ทวนสัญญาณ)

หมายเหตุ a) อุปกรณ์ขยายสัญญาณ ทำหน้าที่ขยายสัญญาณใหม่อีกครั้ง เพื่อให้สามารถส่งสัญญาณไปได้ไกลเท่านั้น (1 R = Reamplify)

b) อุปกรณ์ทวนสัญญาณ ทำหน้าที่ซึ่งโครโนสสัญญาณนาฬิกาเพื่อให้รู้จุดเริ่มต้นของสัญญาณอย่างถูกต้อง, สร้างสัญญาณกลับมาใหม่ และขยายสัญญาณให้แรงขึ้น ก่อนจะส่งไปยังโนดถัดไป เพื่อให้สามารถส่งสัญญาณไปได้ไกลเท่านั้น (3 R = Retime, Regenerate, and Reamplify)

2. ใช้การมอดูเลตสัญญาณและส่งสัญญาณออกสายอากาศ

ในหัวข้อนี้ เราจะกล่าวถึงการแก้ปัญหาข้อที่ 2 เท่านั้น เช่น ถ้าต้องการที่จะส่งสัญญาณเสียงที่มีแถบกว้างความถี่ไม่เกิน 4 kHz ไปในระยะทางที่ไกลสายผ่านทางสายอากาศ (ความยาวของสายอากาศมีขนาดเท่ากับ $\lambda/2$ – dipole หรือ $\lambda/4$ – monopole) โดยอาศัยวิธีการส่งสัญญาณ 2 วิธี ได้แก่

แบบที่ 1 ถ้าเราต้องการส่งสัญญาณออกสายอากาศแบบตรง ๆ เรียกว่า baseband signal คือไม่มีการมอดูเลตสัญญาณ ได้แก่ สัญญาณแบบ Unipolar แบบ non-return-to-zero แบบ Bipolar ฯลฯ ดังนั้น เราจะต้องออกแบบและสร้างสายอากาศแบบ monopole ที่ยาวถึง 22 km ดังแสดงด้วยสมการที่ (1.1) และ (1.2) ซึ่งเป็นไปไม่ได้

$$c = f\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{3400} \approx 88 \text{ km} \tag{1.1}$$

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{88 \text{ km}}{4} \approx 22 \text{ km} \tag{1.2}$$

แบบที่ 2 ถ้าเราต้องการส่งสัญญาณแบบที่มีการมอดูเลตสัญญาณ เรียกสัญญาณดังกล่าวว่า broadband signal อย่างไรก็ตาม เราจะต้องคำนึงถึงย่านความถี่ที่นำมามอดูเลตสัญญาณขึ้นอยู่กับประเภทของการใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น

- ก) ระบบวิทยุกระจายเสียงแบบเอเอ็ม (AM broadcast system) เป็นระบบวิทยุที่แพร่กระจายสัญญาณออกสายอากาศในย่านความถี่กลาง (medium frequency หรือ MF) ประมาณ 800 – 1,650 kHz โดยสัญญาณ AM มีการแพร่กระจายไปตามพื้นผิวโลกดังนั้นจึงถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า surface wave จึงทำให้เครื่องรับวิทยุไม่จำเป็นต้องมีสายอากาศในการรับสัญญาณ
- ข) ระบบวิทยุกระจายเสียงแบบเอฟเอ็ม (FM broadcast system) เป็นระบบวิทยุที่แพร่กระจายสัญญาณออกสายอากาศในย่านความถี่สูงมาก (very high frequency หรือ VHF) ประมาณ 87 – 108 MHz โดยสัญญาณ FM มีการแพร่กระจายสัญญาณแบบจุดต่อจุด (point-to-point communication) กล่าวคือ สายอากาศส่งต้องมีเส้นทางตรง (direct path) ไปยังสายอากาศรับโดยตรง จึงทำให้รับสัญญาณได้ดี

ตัวอย่างที่ 1.1 จงหาค่าความยาวสายอากาศสำหรับระบบ FM เมื่อกำหนดให้คลื่นพารามีค่า 100 MHz

(1) เริ่มต้น คำนวณหาค่าความยาวคลื่นของสัญญาณหลังที่ถูกมอดูเลตด้วยคลื่นพารามี 100 MHz แล้ว

$$c = f\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f_{c_FM}} = \frac{3 \times 10^8}{100 \times 10^6} = 3 \text{ m} \quad (1.3)$$

(2) คำนวณความยาวของสายอากาศแบบโมโนโพลที่ใช้งาน

$$\text{ดังนั้น เราจะได้ว่า} \quad L = \frac{\lambda}{4} = \frac{300 \text{ cm}}{4} = 75 \text{ cm} \quad (1.4)$$

ส่วนระบบวิทยุกระจายเสียงแบบ AM ไม่จำเป็นต้องใช้สายอากาศ จึงไม่จำเป็นต้องแสดงวิธีการคำนวณ อย่างไรก็ตาม ถ้าคำนวณก็จะได้คำตอบไม่ต่ำกว่า 45 เมตรต่อสายอากาศโมโนโพล 1 ต้น จึงไม่เหมาะสมที่จะสร้าง (ทั้งนี้ พื้นผิวโลกทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นแทนสายอากาศ จึงทำให้สัญญาณ AM ส่งไปได้ไกล) ##

1.6 พารามิเตอร์บอกสมรรถนะของระบบ

ในทางปฏิบัติ ระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องมีพารามิเตอร์หรือตัวบ่งชี้ (indicator) ที่บอกถึงสมรรถนะ (performance) หรือประสิทธิภาพ (efficiency) การทำงานของระบบการสื่อสารว่าดีหรือไม่ดีอย่างไร และสมรรถนะที่จะต้องมีการปรับปรุงหรือแก้ไขอย่างไรบ้าง พารามิเตอร์บอกสมรรถนะของระบบการสื่อสารที่สำคัญมีดังนี้

1.6.1 ค่าเอสเอ็นอาร์

ค่าเอสเอ็นอาร์ (signal-to-noise ratio หรือ SNR) เป็นระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้เทียบกับระดับกำลังของสัญญาณรบกวน สำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะนั้น เมื่อกำหนดให้สัญญาณที่รับได้เหมือนกัน ระบบหรือเครื่องรับสัญญาณตัวใดที่สามารถรับค่า SNR ได้สูงกว่า แสดงว่า ระบบหรือเครื่องรับสัญญาณตัวนั้นย่อมมีสมรรถนะในการทำงานที่ดีกว่า ยกตัวอย่างเช่น เครื่องรับ A และ B ถูกผลิตออกมาจากผู้ผลิตเดียวกัน แต่ถูกนำไปทดสอบเพื่อรับสัญญาณเดียวกัน แต่วางที่ตำแหน่งต่างกัน พบว่า เครื่องรับ A รับค่า SNR เท่ากับ 20 dB แต่เครื่องรับ B รับค่า SNR เท่ากับ 18 dB แสดงว่า เครื่องรับ A มีคุณภาพในการใช้งานที่ดีกว่าเครื่องรับ B โดยทั่วไป ค่า SNR จะมีความสัมพันธ์กับอัตราข้อผิดพลาดบิต (bit error rate หรือ BER) กับค่าซีเอ็นอาร์ (carrier-to-noise ratio หรือ CNR) ที่จะกล่าวถึงในหัวข้อย่อถัดไป เช่น ถ้าให้ระบบใช้ SNR มากขึ้น ค่า BER ที่ได้รับก็จะมีค่าลดลง ซึ่งในทางปฏิบัติ เราไม่สามารถยอมให้ระบบทำงานที่ระดับ SNR สูงมาก ๆ ได้ เนื่องจากจะต้องเสียค่าใช้จ่ายมาก ทั้งนี้ ค่าเอสเอ็นอาร์นิยมนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์เพื่อบอกสมรรถนะการทำงานของระบบการสื่อสารทั้งแบบแอนะล็อกและแบบดิจิทัล

1.6.2 ค่าซีเอ็นอาร์

ค่าซีเอ็นอาร์ (CNR) เป็นระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับ ซึ่งยังไม่ได้แยกคลื่นพารามี (demodulation) เมื่อเทียบกับระดับกำลังของสัญญาณรบกวน และเมื่อทำการแยกคลื่นพารามีออกไปแล้ว ค่าซีเอ็นอาร์ก็จะถูกแสดงค่าเป็นค่าเอสเอ็นอาร์และแสดงผลบนจอแอลซีดีของเครื่องมือวัดต่อไป โดยค่าซีเอ็นอาร์นิยมนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์เพื่อบอกสมรรถนะการทำงานของระบบการสื่อสารแบบแอนะล็อกเสียส่วนใหญ่ ได้แก่ การสื่อสารไมโครเวฟและระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียม

1.6.3 ค่าซีไออาร์

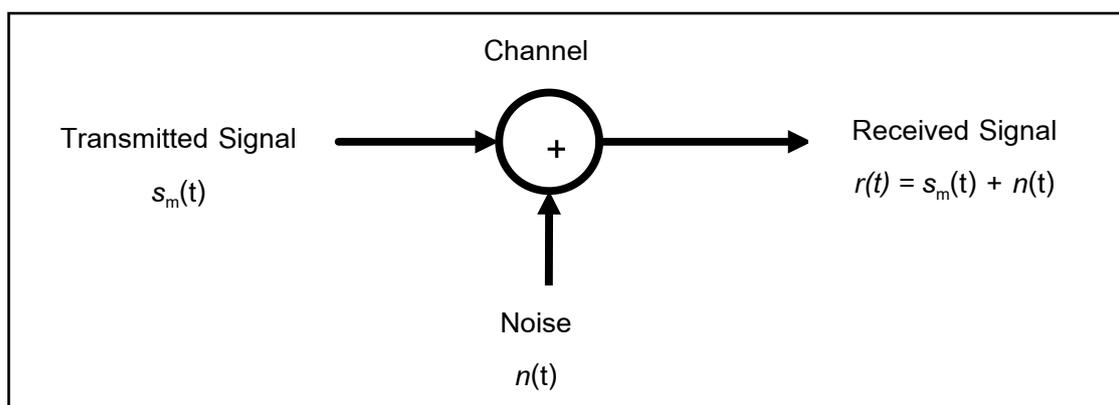
ค่าซีไออาร์ (carrier-to-interference ratio หรือ CIR) เป็นระดับกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับ ซึ่งยังไม่ได้แยกคลื่นพาห์ (demodulation) เมื่อเทียบกับระดับกำลังของสัญญาณแทรกสอด ซึ่งพารามิเตอร์ตัวนี้นิยมใช้ในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ เนื่องจากการนำความถี่เดิมกลับมาใช้ใหม่ในเซลล์ไซต์ที่ห่างออกไป ดังนั้นเครือข่ายต้องมีการตรวจสอบว่ามีสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ถูกแพร่กระจายมารบกวนสัญญาณที่ใช้งานอยู่ในแต่ละเซลล์หรือไม่ ยกตัวอย่างเช่น บางเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้กำหนดให้ค่า CIR ควรมีค่าที่มากกว่า 7 dB และค่า SNR ควรมีค่าไม่ต่ำกว่า -110 dB

1.6.4 อัตราข้อผิดพลาดบิต

อัตราข้อผิดพลาดบิต (BER) หรือค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต (probability of bit error) หมายถึงจำนวนบิตผิดพลาดเมื่อเทียบกับจำนวนบิตที่ส่งทั้งหมด เช่น เครื่องรับได้รับบิตข้อมูลจำนวน 1 ล้านบิตใน 1 วินาที ระบบจะยอมให้บิตข้อมูลผิดพลาดได้เพียง 1 บิตเท่านั้น ดังนั้น ค่า BER มีค่าเท่ากับ $1/10^6$ หรือ $BER = 10^{-6}$ ทั้งนี้ ถ้าเรากำหนดให้ทั้ง 2 ระบบที่พิจารณาใช้ SNR เท่ากัน ระบบใดให้ค่า BER ที่วัดได้ที่ด้านเอาต์พุตของวงจรตรวจหา (detector) มีค่าที่ต่ำกว่า ระบบนั้นก็มีความสามารถในการทำงานที่ดีกว่า เช่น สมมติให้วงจรตรวจหา A กับ วงจรตรวจหา B ถูกนำมาทดสอบเพื่อรับสัญญาณเดียวกัน (SNR เท่ากัน) และมีอัตราการส่งข้อมูล 1 Mbps ปรากฏว่า วงจรตรวจหา A มี $BER = 2 \times 10^{-6}$ ส่วนวงจรตรวจหา B มี $BER = 1 \times 10^{-6}$ ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า วงจรตรวจหา B มีความสามารถดีกว่าวงจรตรวจหา A

1.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของช่องสื่อสาร

ในทางปฏิบัติ การออกแบบระบบสื่อสารจะนิยมใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับช่องสื่อสาร (channel model) เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการสร้างอุปกรณ์ (hardware) ประเมินสมรรถนะการทำงาน จำลองสภาวะการถูกรบกวน นำเสนอวิธีการใหม่เพื่อปรับปรุงระบบ และอื่น ๆ ได้ [2] โดย ผู้อ่านสามารถเลือกใช้โปรแกรมจำลองระบบประเภทใดก็ได้ที่ติดตั้งในเครื่องคอมพิวเตอร์ เช่น โปรแกรม MATLAB (Matrix Laboratory) โปรแกรม SCILAB (Science Laboratory) โปรแกรม Mathematica เป็นต้น



รูปที่ 1.5 แบบจำลองของช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบบวก

1.7.1 ช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบบวก

ช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบบวก (additive noise channel) เป็นช่องทางการสื่อสารที่ง่ายและมีความซับซ้อนน้อย โดยมีสัญญาณรบกวน $\langle n(t) \rangle$ บวกเข้าไปกับสัญญาณที่ส่ง ดังแสดงในรูปที่ 1.5

แหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนเหล่านี้ ได้แก่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วงจรขยายสัญญาณ มีการรบกวนหรือแทรกสอดจากช่องสัญญาณข้างเคียง รวมถึงมีการลดทอนขนาดสัญญาณที่เครื่องรับได้อีกด้วย ฯลฯ

$$r(t) = s_m(t) + n(t) \quad (1.5)$$

1.7.2 ช่องสัญญาณ AWGN

ช่องสัญญาณ AWGN (additive white Gaussian noise) คือช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบววกในรูปที่ 1.5 เพียงแต่สัญญาณรบกวนนี้เป็นสัญญาณรบกวนเกาส์แบบขาวที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความหนาแน่นสเปกตรัมกำลังแบบสองด้าน (two-sided power spectrum density หรือ PSD) เท่ากับ $N_0/2$ วัตต์ต่อเฮิรตซ์ ตัวอย่าง AWGN ได้แก่ สัญญาณรบกวนเชิงความร้อน หรือ สัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

1.7.3 ช่องสัญญาณตัวกรองเชิงเส้น

ช่องสัญญาณตัวกรองเชิงเส้น (linear filter channel) เกิดขึ้นจากระบบที่มีการใช้วงจรกรอง (filter) ที่ภาคส่งในการกรองข้อมูลให้แบนด์วิดท์ที่เหมาะสม ก่อนที่จะส่งเข้าไปในตัวกลาง ดังนั้น สัญญาณที่รับได้ที่วงจรภาครับ คือ

$$r(t) = s_m(t) * h(t) + n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_m(t-\tau) * h(\tau) d\tau + n(t) \quad (1.6)$$

ในที่นี้ * แทนตัวดำเนินการคอนโวลูชัน (convolution operator) และ $h(t)$ เป็นผลตอบสนองอิมพัลส์ (impulse response) ของวงจรกรองเชิงเส้น นอกจากนี้ $h(t)$ อาจจะถูกพิจารณาเป็นสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ (channel coefficient) ในการสื่อสารแบบไร้สาย ก็ได้ โดยตัวอย่างการเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองการส่งบิตข้อมูลแบบรหัสไบนารีพื้นฐาน พร้อมกับการตรวจหาบิตที่ผิดพลาดและการแสดงอัตราข้อผิดพลาดบิตข้อมูลมีแสดงไว้ในตัวอย่างที่ 1.2

1.7.4 ช่องสัญญาณตัวกรองเชิงเส้นที่ไม่แปรผันตามเวลา

ช่องสัญญาณตัวกรองเชิงเส้นที่ไม่แปรผันตามเวลา (linear time-invariant filter channel หรือ LTI filter channel) แทนช่องทางการสื่อสารที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยผลตอบสนองอิมพัลส์ของวงจรกรองเชิงเส้นจะเป็นฟังก์ชันของเวลาในรูปของ $h(t; \tau)$ ซึ่งหมายถึงผลตอบสนองอิมพัลส์ที่เวลา t จะถูกหน่วงเวลาเอาไปใช้ที่เวลา $t - \tau$ ดังนั้น สัญญาณที่รับได้ที่วงจรภาครับ คือ

$$r(t) = s_m(t) * h(t; \tau) + n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_m(t-\tau) * h(t; \tau) d\tau + n(t) \quad (1.7)$$

ตัวอย่างที่ 1.2 จงเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองการสื่อสารแบบไร้สาย เมื่อมีการส่งบิตข้อมูลแบบรหัสไบนารีพื้นฐาน พร้อมกับการตรวจหาบิตที่ผิดพลาดและการแสดงอัตราข้อผิดพลาดบิตข้อมูลที่เกิดขึ้น

```

clear
N = 10^5; % number of bits or symbols (บิตข้อมูลจำนวน 100,000 บิต)
Eb_NO_dB = [0:25]; % multiple Eb/NO values
c = zeros(1,N);
for jj=1:length(Eb_NO_dB)
    % Transmitter
    ip = rand(1,N)>0.5; % generating 0,1 with equal probability
    s = 2*ip-1; % BPSK modulation 0 -> -1; 1 -> 0
    % channel model
    h = 1/sqrt(2)*[randn(1,N) + j*randn(1,N)]; % Rayleigh channel coefficient
    n = 1/sqrt(2)*[randn(1,N) + j*randn(1,N)]; % white gaussian noise, 0dB variance
    % Received Signal with noise addition
    y = h.*s + 10^(-Eb_NO_dB(jj)/20)*n;
    % equalization maximal ratio combining
    yHat = sum(conj(h).*y,1)/sum(h.*conj(h),1);
    % receiver - hard decision decoding
    ipHat_1 = real(yHat)>0;
    % counting the errors
    nErr_1(jj) = size(find([ip- ipHat_1]),2);
end
simBer_1 = nErr_1/N; % simulated BER
semilogy(Eb_NO_dB,simBer_1(1,:), 'ks-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Eb/No, dB');
ylabel('Bit Error Rate');

```

หมายเหตุ จุดประสงค์ของโปรแกรมนี้คือเพื่อให้ผู้อ่านได้คุ้นเคยกับการเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองการสื่อสารแบบไร้สายเท่านั้น ซึ่งมีเนื้อหาบางส่วนที่ยังไม่ได้กล่าวถึงในบทที่ 1 นี้ จึงขอให้อ่านได้ศึกษาเพิ่มเติมด้วยตนเองไปก่อน

1.8 วิวัฒนาการของอุปกรณ์และวิธีการต่าง ๆ ในระบบการสื่อสาร

การสื่อสารข้อมูลเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างผู้ส่งกับผู้รับโดยผ่านตัวกลางในการส่งสัญญาณ ได้แก่ สายเคเบิล อากาศ เป็นต้น มนุษย์จึงได้คิดค้นวิธีการและเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารในสมัยโบราณ ได้แก่ การใช้โล่สะท้อนแสงอาทิตย์ การใช้สัญญาณควันไฟ รวมถึงการใช้ม้าเร็ว ฯลฯ สำหรับระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้านั้นอาจจะพิจารณาได้ว่ามีจุดเริ่มต้นในช่วงกลางศตวรรษที่ 18 (ช่วงปี ค.ศ. 1700 - ค.ศ. 1800) หลังจากที่นาย Stephan Gray ได้แสดงให้เห็นว่า เชือกที่เปียกสามารถใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าสถิตได้ ต่อมา การค้นพบกระแสเหนี่ยวนำ ระบบโทรเลขเชิงไฟฟ้า รหัสมอร์ส โทรศัพท์ การค้นพบการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การส่งคลื่นวิทยุทางไกล การคำนวณค่าความจุของช่องสัญญาณสูงสุด การ

นำเสนอรหัสแก้ไขข้อผิดพลาด (error correction code หรือ ECC) แบบต่าง ๆ รวมไปถึงเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 1 – 5 ก็ถูกนำเสนอออกมาอย่างต่อเนื่องโดยนักวิจัย วิศวกรและนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก ตั้งแต่ ค.ศ. 1700 จนถึงปัจจุบันนี้ โดยลำดับเหตุการณ์ของการประดิษฐ์และการนำเสนออุปกรณ์/วิธีการต่าง ๆ ของโลกที่เกี่ยวข้องกับระบบการสื่อสารแอนะล็อกกับดิจิทัลมีแสดงไว้ในตารางที่ 1.3 ในหน้าถัดไป

ตารางที่ 1.3 วิวัฒนาการของระบบการสื่อสารที่สำคัญของโลก

ปี ค.ศ.	เหตุการณ์ที่สำคัญ
1831	Michael Faraday ค้นพบกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เกิดจากแม่เหล็กเคลื่อนที่ใกล้กับตัวนำ
1837	Samuel Morse ประดิษฐ์โทรเลข (telegraph) และรหัสมอร์ส เพื่อใช้สื่อสารทางไกล
1864	Maxwell ได้ทำนายการแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสรุปสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
1876	Alexander Graham Bell ประดิษฐ์โทรศัพท์ (รับส่งเสียงพูด) – จุดเริ่มต้นระบบแอนะล็อก
1887	Heinrich Hertz ได้ทดลองทฤษฎีของแมกซ์เวลล์และค้นพบการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
1901	Guglielmo Marconi ได้ทดลองส่งคลื่นวิทยุทางไกลข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกได้สำเร็จ
1924	Harry Nyquist เสนอทฤษฎีบทการชักตัวอย่างให้กับสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์ที่จำกัด
1939	เริ่มมีการแพร่กระจายภาพโทรทัศน์ (TV broadcasting) ในเชิงพาณิชย์
1943	McCulloch ได้เสนอแบบจำลองเซลล์ประสาทในลักษณะแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
1947	ประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์และเริ่มต้นการพัฒนาด้านวงจรรวม (integrated circuit หรือ IC)
1948	Claude Shannon เสนอทฤษฎีบทของแซนนอน – ระบบสื่อสารดิจิทัลเริ่มฟื้นกลับมา
1949	Hebb ได้เสนอทฤษฎีการเรียนรู้ของเฮบบ์ (หลักการ “เซลล์ที่ทำงานร่วมกันจะเชื่อมต่อกัน”)
1958	Rosenblatt ได้เสนอ “เพอร์เซปตรอน” ซึ่งเป็นการเรียนรู้แบบมีผู้สอน
1962	เริ่มมีการสื่อสารผ่านดาวเทียม TELSTAR 1 และระบบการส่งสัญญาณแบบ T1
1970	เริ่มใช้เส้นใยนำแสงและสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งเริ่มระบบเครือข่าย LAN, MAN, WAN
1974	วิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ (backpropagation) ได้ถูกนำเสนอ
1978	เริ่มมีการใช้ระบบระบุตำแหน่งสากล (global positioning system หรือ GPS)
1979	เริ่มใช้งานระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 1 (1G) – อาศัยเทคนิค FDMA
1991	เริ่มใช้งานระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 (2G) – อาศัยเทคนิค TDMA และ GPRS
1998	นำเสนอมาตรฐาน Wideband CDMA
2000	นำเสนอมาตรฐาน IMT 2000 และระบบ UMTS
2001	เริ่มใช้งานระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 (3G) – อาศัยเทคนิค CDMA
2004	นำเสนอมาตรฐาน WiMAX (Wireless WAN)
2009	เริ่มใช้งานระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 4 (4G) – อาศัยเทคนิค MIMO และ OFDM
2011	multi-task deep neural network ได้ถูกนำเสนอ (จุดเริ่มต้นของ deep learning)
2012	ITU-R ได้เริ่มจัดทำข้อเสนอแนะสำหรับเทคโนโลยี 5G (มาตรฐาน IMT 2020 ขึ้นไป)

1.9 สรุปเนื้อหาบทที่ 1

ในบทที่ 1 นี้ได้อธิบายหัวข้อพื้นฐานที่สำคัญของหลักการสื่อสารด้วยไฟฟ้า ได้แก่ บล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า แหล่งกำเนิดข่าวสารประเภทต่าง ๆ ช่องสัญญาณการสื่อสารแบบใช้สาย

กับแบบไร้สาย ข้อแตกต่างของสัญญาณแอนะล็อกกับสัญญาณดิจิทัล การมอดูเลตและสายอากาศสำหรับส่งข่าวสารแบบไร้สายระยะไกล นอกจากนี้ ยังได้อธิบายเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ใช้บอกสมรรถนะของระบบ ได้แก่ ค่าซีเอ็นอาร์ ค่าซีเอ็นอาร์ ค่าซีไออาร์ และอัตราข้อผิดพลาดบิต รวมถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของช่องสื่อสาร เช่น ช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบบวกรวม ช่องสัญญาณ AWGN ช่องสัญญาณตัวกรองเชิงเส้น เป็นต้น หัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงวิวัฒนาการของอุปกรณ์และวิธีการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการสื่อสารด้วยไฟฟ้า เพื่อให้เห็นลำดับเหตุการณ์ของงานวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการสื่อสารด้วยไฟฟ้า

1.10 แบบฝึกหัดบทที่ 1

1. จงเขียนบล็อกไดอะแกรมที่แสดงอุปกรณ์และส่วนต่าง ๆ ของ “การส่งข้อความผ่านโปรแกรมไลน์จากโทรศัพท์มือถือต้นทางไปยังคอมพิวเตอร์ปลายทาง” (คล้ายกับตารางที่ 1.1)
2. ทำไมการสื่อสารจึงจำเป็นต้องมีการมอดูเลต (modulation) ข่าวสารจากแหล่งกำเนิด (source) ประเภทต่าง ๆ ก่อนที่จะส่งสัญญาณออกไปทางสายอากาศ พร้อมทั้งจงบอกข้อดีของการมอดูเลตข่าวสาร
3. จงหาค่า SNR ในหน่วย linear scale เมื่อกำหนดให้ค่า SNR ในหน่วยเดซิเบล (decibel) มีค่าเท่ากับ 20 dB และ 40 dB ตามลำดับ โดยหน่วยเดซิเบลนั้นหาค่าได้จากฟังก์ชันล็อกกริทึมหรือ logarithm scale
4. จงหาค่า SNR ในหน่วย dB เมื่อกำหนดให้ค่า SNR ในหน่วย linear scale มีค่าเท่ากับ 20, 50 กับ 150
5. จงเขียนโปรแกรมเพื่อแสดงช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบบวกรวม (additive noise) กับช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN (additive white Gaussian noise)
6. จงหาค่าความยาวของสายอากาศสำหรับระบบ AM เมื่อกำหนดให้คลื่นพารามีค่า 1 MHz
7. เพราะเหตุใดจึงมีการนำช่องสัญญาณ AWGN ไปใช้ในการจำลองช่องสัญญาณสื่อสารในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย (wireless communication)
8. จงอธิบายความหมายของการทำคอนโวลูชัน (convolution) ในสมการที่ (1.6) ในระบบการสื่อสาร
9. จงหาค่าอัตราการส่งข้อมูลและระยะทางในการส่งข้อมูลด้วยสายส่งจำพวก unshielded twisted pair (UTP) ได้แก่ UTP cat 5, UTP cat 5e, UTP cat 6, UTP cat 6e, UTP cat 7, UTP cat 7e
10. จงอธิบายความแตกต่างของโครงสร้างของสายนำสัญญาณจำพวก UTP, STP, FTP (foil twisted pair, coaxial cable และ optical fiber

บทที่ 2

พื้นฐานของสัญญาณและระบบ

ผลการเรียนรู้ที่คาดหวังของบทที่ 2

- เข้าใจและสามารถนำสัญญาณแต่ละประเภทไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง
- เข้าใจและอธิบายการทำงานของระบบแต่ละประเภทได้อย่างถูกต้อง
- เข้าใจและอธิบายผลตอบสนองอิมพัลส์กับการคอนโวลูชันสัญญาณได้
- เข้าใจและสามารถคำนวณหาค่าพลังงานและกำลังของสัญญาณได้

สัญญาณและระบบเป็นคำศัพท์ที่สำคัญของการสื่อสารด้วยไฟฟ้า ดังนั้นในการเรียนรู้เกี่ยวกับหลักการสื่อสารด้วยไฟฟ้า จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ควรจะต้องรู้หัวข้อพื้นฐานต่าง ๆ ของสัญญาณและระบบ ได้แก่ ประเภทของสัญญาณ ประเภทของระบบ ผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบที่มีต่อสัญญาณอินพุต การคอนโวลูชันสัญญาณ รวมถึงตัวอย่างการนำสัญญาณและระบบไปใช้งานในทางปฏิบัติ

2.1 ประเภทของสัญญาณ

สัญญาณ (signal) คือ ปริมาณทางกายภาพที่เป็นตัวแทนของข้อมูลหรือข่าวสารที่ถูกแสดงในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ใด ๆ และสามารถป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อกระตุ้นระบบให้ทำงานตามที่เรากำลังต้องการได้ หรืออาจจะกล่าวได้ว่า สัญญาณเปรียบเสมือนฟังก์ชันใด ๆ ที่มีข้อมูลหรือข่าวสารบรรจุอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากเนื้อหาที่กล่าวถึงเป็นระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้า รายละเอียดของสัญญาณแต่ละประเภทที่สำคัญต่อการศึกษาระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้ามี่ดังนี้

2.1.1 สัญญาณต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณไม่ต่อเนื่องทางเวลา

สัญญาณต่อเนื่องทางเวลา (continuous-time signal) คือ สัญญาณที่มีแอมพลิจูดต่อเนื่องไม่จำกัดและมีการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดตลอดเวลา ได้แก่ สัญญาณเสียง สัญญาณวิดีโอ ฯลฯ ถ้ากำหนดให้ $x(t)$ แทนสัญญาณต่อเนื่องทางเวลา ค่าของเวลา t นั้นจะเป็นเลขจำนวนจริง โดยทั่วไปเรามักจะแสดงสัญญาณต่อเนื่องทางเวลาในรูปของฟังก์ชันตรีโกณมิติ sin หรือ cos เรียกว่า สัญญาณไซน์ซอยด์ (sinusoidal signal) ที่อยู่ในรูปของสมการที่ (2.1)

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \theta) = A \cos(2\pi f_0 t + \theta) \quad (2.1)$$

โดย A คือแอมพลิจูดหรือขนาดของสัญญาณ, ω_0 คือค่าความถี่เชิงมุม (angular frequency), f_0 คือค่าความถี่ (frequency) และ θ คือเฟส (phase) หรือค่ามุมเริ่มต้นของสัญญาณ

ส่วนสัญญาณดีสครีตทางเวลา (discrete-time signal) หรือถูกเรียกว่า สัญญาณเต็มหน่วย คือสัญญาณที่เกิดจากแหล่งกำเนิดข่าวสารที่สร้างขนาดของข้อมูลที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (เป็นขั้น ๆ) โดยค่าของ

สัญญาณดิจิตอลเป็นเซตจำกัด ได้แก่ สัญญาณไบนารี (สัญญาณดิจิตอล) สัญญาณหลายระดับ และสัญญาณต่อเนื่องทางเวลาที่ถูกซัดตัวอย่าง ฯลฯ

การนำสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลามาซัดตัวอย่าง (sampling) นั้น ก็เพื่อที่จะทำการเปลี่ยนจากสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิตอลหรือสัญญาณดิจิตอล (analog-to-digital conversion หรือ ADC) แล้วนำสัญญาณดิจิตอลไปใช้ในงานประเภทต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น การบันทึกเสียงพูดและภาพวิดีโอไว้ในหน่วยความจำของกล้องถ่ายรูปหรือคอมพิวเตอร์ หรือ การส่งสัญญาณเสียงพูดผ่านเครือข่ายโทรศัพท์ โดยอาศัยการมอดูเลตรหัสพัลส์ (pulse-code modulation หรือ PCM) เป็นต้น ในที่นี้ สัญญาณข้อมูลที่ต่อเนื่องทางเวลาที่มีความถี่ f_0 Hz จะถูกซัดตัวอย่างโดยอาศัยทฤษฎีบทของไนควิสต์ (Nyquist's Theorem) กล่าวคือ ความถี่ที่ใช้ในการซัดตัวอย่าง (f_s) ต้องมีค่าความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ $2f_0$ ($f_s \geq 2f_0$) ซึ่งส่วนกลับของค่าความถี่ซัดตัวอย่างก็คือ “คาบของการซัดตัวอย่าง” โดยทั่วไป เรานิยมใช้ค่า $f_s = 2f_0$ ตัวอย่างเช่น

- เสียงพูดของคนที่มีความถี่อยู่ในช่วง 300 - 3,400 Hz ในทางปฏิบัติ ย่านความถี่เสียงดังกล่าวถูกประมาณว่ามีค่าไม่เกิน 4 kHz จึงควรใช้ความถี่ซัดตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 8 kHz

- ภาพวิดีโอหรือภาพเคลื่อนไหว (video signal) จำนวนหนึ่งมีความถี่ไม่เกิน 12 MHz ดังนั้นในทางปฏิบัติ จะใช้ความถี่ซัดตัวอย่างสัญญาณภาพนี้ควรมีค่าน้อยเท่ากับ 24 MHz

ตัวอย่างที่ 2.1 จงเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างสัญญาณคาบต่อไปนี้

ก. สัญญาณไซน์ซอดต์ที่ต่อเนื่องทางเวลาที่มีค่า f_0 เท่ากับ 2 Hz ค่า A เท่ากับ 1 V และค่า θ เท่ากับ 0 องศา

ข. สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาที่เกิดขึ้นจากการซัดตัวอย่างสัญญาณในข้อ ก ($f_s = 0.0156 \text{ Hz}$)

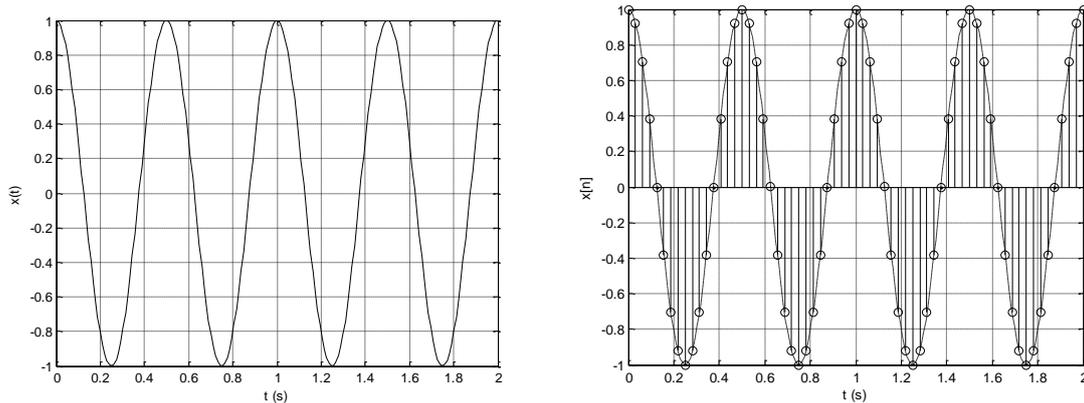
โปรแกรมเพื่อสร้างสัญญาณคาบที่ต่อเนื่องทางเวลา ตอบคำถามข้อ ก ในรูปของฟังก์ชัน cosine

```
t = 0:pi/300:2;
A = 1;
f0 = 2;
x = A*cos(2*pi*f0*t);
plot(t,x,'k-');
grid on
```

โปรแกรมเพื่อสร้างสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา ตอบคำถามข้อ ข ($f_s = 1/32 * 2 = 0.0156 \text{ Hz}$)

```
A = 1;
f0 = 2;
n = 0:1/32:2;
t = 0:pi/300:2;
x = A*cos(2*pi*f0*n);
stem(n,x,'k')
hold on
y = A*cos(2*pi*f0*t);
plot(t,y,'k--')
grid on
```

##



รูปที่ 2.1 ผลการรันโปรแกรม MATLAB ตัวอย่างที่ 2.1 ข้อ ก (ซ้าย) และ ข้อ ข (ขวา)

2.1.2 สัญญาณจริงและสัญญาณเชิงซ้อน

สัญญาณจริง (real signal) เป็นสัญญาณที่มีค่าระดับความสูงเป็นจำนวนจริง (เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ฯลฯ) ที่ซึ่งอาจจะพิจารณาได้ว่า สัญญาณจริงเป็นสัญญาณที่มีส่วนจริง เฉพาะพจน์แรกทางขวาสุดของสมการที่ (2.2) เท่านั้น $\{x_r(t)\}$ ส่วนสัญญาณเชิงซ้อน (complex signal) เป็นสัญญาณที่มีค่าระดับความสูงเป็นจำนวนเชิงซ้อน (เช่น สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณในการสื่อสาร $\langle h(t) \rangle$ ที่กล่าวถึงไปแล้วในหัวข้อที่ 1.7 ฯลฯ) ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนจริง (real part) และส่วนจินตภาพ (imaginary part) ที่อยู่ในรูปของสมการที่ (2.2) $\{x_r(t), x_i(t)\}$

$$x(t) = Ae^{j(\omega_0 t + \theta)} = Ae^{j(2\pi f_0 t + \theta)} = x_r(t) + jx_i(t) = A[\cos(\omega_0 t + \theta) + j \sin(\omega_0 t + \theta)] \quad (2.2)$$

ในที่นี้ สัญญาณเชิงซ้อนหาขนาดได้จาก $|x(t)| = A = \sqrt{x_r(t)^2 + x_i(t)^2}$ และเฟสของสัญญาณเชิงซ้อนหาค่าได้จาก $\angle x(t) = \tan^{-1} \langle x_i(t) / x_r(t) \rangle$ ดังนั้น เราสามารถเขียนในรูปของ $x(t) = A \angle x(t)$

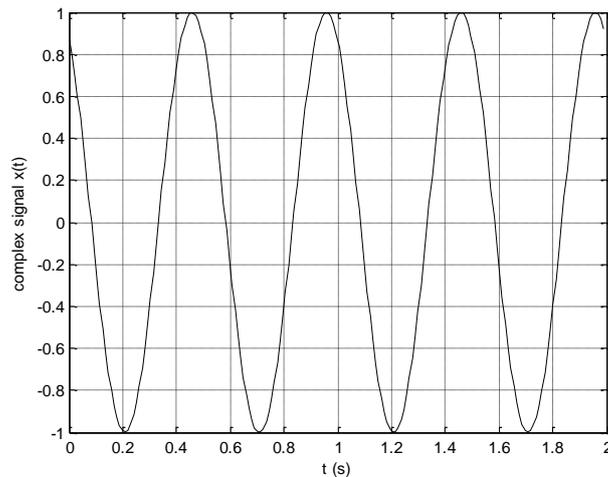
ตัวอย่างที่ 2.2 จงเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างสัญญาณเชิงซ้อน $Ae^{j(\omega_0 t + \theta)}$ ที่มีค่า f_0 เท่ากับ 2 Hz, A เท่ากับ 1 V, และ θ เท่ากับ 30 องศา

โปรแกรม MATLAB

```
t = 0:pi/300:2;
A = 1;
f0 = 2;
theta=30;
x = A*exp(j*(2*pi*f0*t+theta*pi/180));
plot(t,x,'k-')
xlabel('t (s)');
ylabel('complex signal x(t)');
grid on
```

##

กราฟแสดงผลการรัน



รูปที่ 2.2 ผลการรันโปรแกรมสร้างสัญญาณเชิงซ้อนในตัวอย่างที่ 2.2 ที่มีค่ามุมเริ่มต้น 30 องศา

2.1.3 สัญญาณกำหนดได้และสัญญาณสุ่ม

สัญญาณกำหนดได้ (deterministic signal) เป็นสัญญาณที่เมื่อเรารู้ค่าข้อมูลบางอย่าง (อาจจะเป็นค่าจริงหรือค่าเชิงซ้อนก็ได้) เกี่ยวกับสัญญาณนั้นอย่างเพียงพอแล้ว เราก็จะสามารถบอกถึงรูปลักษณะและค่าต่างๆ ที่แน่นอนของสัญญาณดังกล่าวทั้งในอดีตและอนาคตได้อย่างถูกต้อง ส่วนสัญญาณสุ่มนั้นเป็นสัญญาณที่ไม่สามารถกำหนดค่าที่แน่นอนได้ ถึงแม้ว่าเราจะรู้ข้อมูลต่างๆ ที่ผ่านมาแล้ว มากเพียงใดก็ตาม ได้แก่ สัญญาณรบกวน, สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณไร้สาย, สัญญาณที่รับที่เครื่องรับ (y) ฯลฯ ที่ซึ่งมักจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (probability density function หรือ pdf)

2.1.4 สัญญาณคาบและสัญญาณไม่เป็นคาบ

สัญญาณคาบ (periodic signal) เป็นสัญญาณที่มีรูปแบบของสัญญาณซ้ำรูปเดิมทุก ๆ ช่วงเวลาที่มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง T โดยค่าเวลา T ที่น้อยที่สุดถูกเรียกว่า คาบ (period) ยกตัวอย่างเช่น สัญญาณไซน์ซอซด์ (ดังแสดงในตัวอย่างที่ 2.1) สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่ยาวต่อเนื่อง ฯลฯ นอกจากนี้ สัญญาณคาบนั้นยังถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ สัญญาณคาบที่ต่อเนื่องทางเวลาและสัญญาณคาบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (สัญญาณคาบที่ต่อเนื่องทางเวลา แต่ถูกซีกตัวอย่าง) โดยมีคุณสมบัติเป็นไปตามสมการที่ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

$$x(t + kT) = x(t) \quad (2.3)$$

สำหรับทุก ๆ ค่าของเวลา t และจำนวนเต็ม k รวมถึงบางค่าของคาบ T ที่เป็นจำนวนจริงบวก

$$x[n + kN_0] = x[n] \quad (2.4)$$

สำหรับทุก ๆ ค่าของเวลา n และจำนวนเต็ม k รวมถึงบางค่าของจำนวนเต็มบวก T (ในที่นี้ คาบ T อาจจะถูกเรียกว่าคาบของการซีกตัวอย่างก็ได้) ส่วนสัญญาณไม่เป็นคาบ (aperiodic signal) นั้นเป็น

สัญญาณที่ไม่มีรูปแบบของสัญญาณซ้ำรูปเดิมเลย เช่น สัญญาณขั้นหนึ่งหน่วย (unit step) สัญญาณอิมพัลส์ (impulse) ฯลฯ

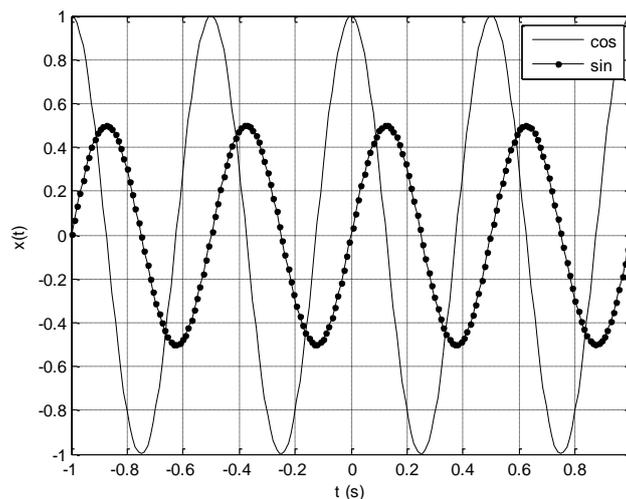
2.1.5 สัญญาณคู่และสัญญาณคี่

สัญญาณคู่ (even signal) คือสัญญาณที่มีคุณสมบัติสมมาตรคู่และเป็นไปตามความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ (2.5) ได้แก่ สัญญาณที่อยู่ในรูปของฟังก์ชัน cosine ส่วนสัญญาณคี่ (odd signal) คือสัญญาณที่มีคุณสมบัติสมมาตรคี่และเป็นไปตามความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ (2.6) ได้แก่ สัญญาณที่อยู่ในรูปของฟังก์ชัน sin

$$x(-t) = x(t) \tag{2.5}$$

$$x(-t) = -x(t) \tag{2.6}$$

รูปภาพของสัญญาณคู่และสัญญาณคี่นั้นมีแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 สำหรับสัญญาณเชิงซ้อนใด ๆ ถ้าส่วนจริงเป็นสัญญาณคู่และส่วนจินตภาพเป็นสัญญาณคี่ จะถือว่ามีคุณสมบัติสมมาตรแบบเฮอร์มิตเทียน (Hermitian Symmetry)



รูปที่ 2.3 สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาที่เป็นสัญญาณคู่ (ฟังก์ชัน cosine) และสัญญาณคี่ (ฟังก์ชัน sin)

2.1.6 สัญญาณพลังงานและสัญญาณกำลัง

สัญญาณพลังงาน (energy signal) คือสัญญาณ $x(t)$ ใด ๆ ที่มีค่าพลังงานทั้งหมดจากตัวมันเองมีค่าจำกัด ได้แก่ สัญญาณพัลส์ต่าง ๆ เป็นต้น กล่าวคือ

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} |x(t)|^2 dt < \infty \tag{2.7}$$

สัญญาณกำลัง (power signal) คือสัญญาณใด ๆ ที่มีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามเงื่อนไขสมการที่ (2.7) แต่ค่าเฉลี่ยของงานที่ทำได้ต่อเวลาหรือค่ากำลังงานเฉลี่ย ($P=W/t$) ของสัญญาณมีค่าจำกัด ได้แก่ สัญญาณแบบต่าง ๆ ที่ยาวต่อเนื่องทางเวลาจาก $-\infty$ ไปจนถึง ∞ ดังแสดงในสมการที่ (2.8)

$$0 < P = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (2.8)$$

โดยในที่นี้ สมการของค่าพลังงานและค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณ $x(t)$ ใด ๆ อยู่ในรูปกำลังสอง ก็เพราะว่า $x(t)$ เป็นตัวแทนของสัญญาณกระแสไฟฟ้าหรือสัญญาณแรงดันไฟฟ้าก็ได้ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับกำลังของสัญญาณโดยตรงที่เป็นไปตามสมการพื้นฐานคือ $P(t) = |x(t)|^2 R = |x(t)|^2 / R$ เมื่อ R เป็นตัวต้านทานของโหลด ตามลำดับ อีกทั้ง ถ้าเราเพิ่มสมมติฐานที่ว่าตัวต้านทาน R มีค่าเท่ากับ 1 โอห์ม ก็จะทำให้ได้สมการตามที่ปรากฏไว้ข้างต้นและจากการพิจารณาสมการที่ (2.8) พบว่า สัญญาณหนึ่ง ๆ ที่มีค่าพลังงานจำกัดจะต้องมีค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณเท่ากับ 0

หมายเหตุ ข้อสังเกตที่น่าสนใจคือ สัญญาณพลังงานมักจะเกิดขึ้นกับสัญญาณที่ไม่มีคาบและสัญญาณกำลังมักจะเกิดขึ้นกับสัญญาณที่มีคาบ ดังแสดงในตัวอย่างคำนวณที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

ตัวอย่างที่ 2.3 จงหาค่าพลังงานของสัญญาณ $x(t) = A[u(t+a) - u(t-a)]$ เมื่อกำหนดให้ $a > 0$ และ

$$u(t) = \begin{cases} 1; t > 0 \\ 0; t \leq 0 \end{cases} \text{ เป็นสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วย (unit step function)}$$

วิธีทำ จากสมการของสัญญาณ พบว่าเป็นสัญญาณพัลส์ 1 ลูกที่มีความสูงของพัลส์เท่ากับ A หน่วย และมีความกว้างพัลส์เท่ากับ $2a$ วินาที ซึ่งเป็นสัญญาณที่มีช่วงเวลาแน่นอน ทำให้หาค่าของพลังงานของสัญญาณได้ดังนี้

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-a}^a A^2 dt = 2aA^2$$

ดังนั้น พลังงานของสัญญาณจึงมีค่าเท่ากับ $2aA^2$ จูล

##

ตัวอย่างที่ 2.4 จงหาค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณ $x(t) = A \sin(t)$

จากสมการของสัญญาณ พบว่าเป็นสัญญาณ \sin ที่ยาวต่อเนื่องทางเวลาและมีคาบเท่ากับ 2π ทำให้ต้องหาค่าของกำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณโดยอาศัยสมการที่ (2.8) ดังนี้

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} A^2 \sin^2 t dt \quad ; \quad \sin^2 t = (1 - \cos 2t) / 2$$

$$= \frac{A^2}{4\pi} \left[\int_0^{2\pi} (1 - \cos 2t) dt \right] = \frac{A^2}{4\pi} [2\pi] = \frac{A^2}{2}$$

ดังนั้น กำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณจึงมีค่าเท่ากับ $A^2/2$ วัตต์

##

2.2 ตัวอย่างของสัญญาณที่สำคัญในระบบสื่อสาร

2.2.1 สัญญาณไซน์ซออยด์

สัญญาณไซน์ซออยด์ (sinusoidal signal) เป็นสัญญาณต่อเนื่องทางเวลาที่อยู่ในรูปของฟังก์ชัน \sin หรือ \cosine ก็ได้ เนื่องจากฟังก์ชัน \cosine จะนำฟังก์ชัน \sin อยู่ 90 องศา ($\sin \theta = \cos(\pi/2 - \theta)$ เช่น $\sin 30^\circ = \cos 60^\circ = 0.5$) ในที่นี้ เราจะเรียกสัญญาณนี้ว่าสัญญาณจริงก็ได้ ดังสมการที่ (2.9)

$$x(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \theta) \quad (2.9)$$

โดยสมการที่ (2.9) นี้เป็นสมการเดียวกับสมการที่ (2.1) ซึ่งได้อธิบายพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไปแล้วก่อนหน้านี้

2.2.2 สัญญาณเอกซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน

สัญญาณเอกซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน (complex exponential signal) เป็นสัญญาณต่อเนื่องทางเวลาที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลที่มีค่าของเลขยกกำลังเป็นจำนวนเชิงซ้อน ทั้งนี้เราจะเรียกสัญญาณนี้ว่าสัญญาณเชิงซ้อนก็ได้ ดังสมการที่ (2.10)

$$x(t) = A e^{j(2\pi f_0 t + \theta)} \quad (2.10)$$

โดย A คือแอมพลิจูด (amplitude) ของสัญญาณ f_0 คือค่าความถี่ (frequency) ของสัญญาณ และ θ คือเฟส (phase) ของสัญญาณ ส่วนขนาดและเฟสของสัญญาณเชิงซ้อนสามารถหาค่าได้จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.1.2 สัญญาณจริงและสัญญาณเชิงซ้อน

2.2.3 สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม

สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม (rectangular pulse) เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีคุณสมบัติตามสมการที่ (2.11)

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1 & ; -0.5 < t < 0.5 \\ 0 & ; elsewhere \end{cases} \quad (2.11)$$

โดยพัลส์สี่เหลี่ยมอาจจะสร้างขึ้นจากสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยเช่น $\Pi(t) = u(t + 0.5) - u(t - 0.5)$

2.2.4 สัญญาณพัลส์สามเหลี่ยม

สัญญาณพัลส์สามเหลี่ยม (triangular pulse) เป็นสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีคุณสมบัติตามสมการที่ (2.12)

$$\Lambda(t) = \begin{cases} t+1 & ; -1 \leq t \leq 0 \\ -t+1 & ; 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & ; elsewhere \end{cases} \quad (2.12)$$

โดยพัลส์สามเหลี่ยมอาจจะถูกสร้างขึ้นจากพัลส์สี่เหลี่ยม ดังสมการ $\Lambda(t) = \Pi(t) \otimes \Pi(t)$ โดยในที่นี้ เครื่องหมาย \otimes คือ การคอนโวลูชัน (convolution) สัญญาณ ที่ซึ่งเป็นการคูณกันโดยอาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยรายละเอียดเกี่ยวกับการคอนโวลูชันนั้นจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.3.5 พร้อมกับมีตัวอย่างการคำนวณหาค่าโดยใช้โปรแกรม MATLAB เนื่องจากมีฟังก์ชันที่ใช้ในการหาค่าคอนโวลูชันโดยเฉพาะคือ ฟังก์ชัน conv

2.2.5 สัญญาณขั้นหนึ่งหน่วย

สัญญาณขั้นหนึ่งหน่วย (unit step signal) เป็นสัญญาณที่มีคุณสมบัติดังแสดงในสมการที่ (2.13a)

$$u(t-t_0) = \begin{cases} 1 & ; t \geq t_0 \\ 0 & ; t < t_0 \end{cases} \quad (2.13a)$$

ทั้งนี้ เรานิยามนำสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยนี้ไปใช้งานเพื่อคูณกับสัญญาณใด ๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นสัญญาณคอซัล (causal signal) ยกตัวอย่างเช่น

$$y(t) = t * u(t) = \begin{cases} t & ; t \geq 0 \\ 0 & ; t < 0 \end{cases} \quad (2.13b)$$

กล่าวคือ สัญญาณ $y(t)$ นี้จะเรียกว่าคอซัล เมื่อ $y(t)$ มีค่าที่เวลา $t \geq 0$ เท่านั้น และ $y(t) = 0$ เมื่อ $t < 0$ ในทางกลับกัน สัญญาณใด ๆ ก็ตามที่มีคุณสมบัติตรงข้ามกับสมการที่ (2.13b) จะถูกเรียกว่า สัญญาณนอนคอซัล (noncausal signal) รูปกราฟของสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วย (unit step function) มีแสดงไว้ในตัวอย่างที่ 2.5

2.2.6 สัญญาณอิมพัลส์

สัญญาณอิมพัลส์ (impulse signal) มีรายละเอียดและคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องและสำคัญ ดังนี้

1. ในการวาดรูปฟังก์ชันอิมพัลส์นั้น เราจะใช้เส้นตรงที่มีลูกศรชี้พุ่งขึ้นที่ตำแหน่งเวลา $t = t_0$ เพื่อแสดงว่ามันมีขนาดที่กำหนดค่าไม่ได้และใช้ตัวอักษรแสดงค่าน้ำหนักกำกับไว้ข้าง ๆ ลูกศรนั้นดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ขวา) ของตัวอย่างที่ 2.6

2. ฟังก์ชันอิมพัลส์นั้นมีคุณสมบัติการสมมาตรกล่าวคือ $\delta(t) = \delta(-t)$

3. สัญญาณอิมพัลส์ $\delta(t-t_0)$ เป็นฟังก์ชันที่ไม่เหมือนฟังก์ชันธรรมดาทั่วไป กล่าวคือสัญญาณจะมีขนาดที่กำหนดค่าไม่ได้ที่เวลา $t = t_0$ และมีค่าเป็น 0 ที่เวลาอื่น ๆ ดังแสดงในสมการที่ (2.14) โดยทั่วไป มักจะพบสัญญาณอิมพัลส์ที่มีค่า $t_0 = 0$ กล่าวคืออยู่ในรูปของ $\delta(t)$

$$\delta(t-t_0) = \begin{cases} \infty & ; t = t_0 \\ 0 & ; t \neq t_0 \end{cases} \quad (2.14)$$

4. ปริพันธ์หรือพื้นที่ใต้เส้นโค้งของ $\delta(t-t_0)$ ก็มีค่าเท่ากับ 1 หน่วย ดังแสดงในสมการที่ (2.15)

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) dt = 1 \tag{2.15}$$

ค่าที่ได้จากการทำปริพันธ์ตามสมการที่ (2.15) นี้ถูกเรียกว่า **น้ำหนัก (weight)** ดังนั้นน้ำหนักของฟังก์ชัน $A\delta(t - t_0)$ จึงมีค่าเท่ากับ A หน่วย และถ้า $A = 1$ นั่นก็คือ ฟังก์ชันอิมพัลส์มีน้ำหนัก 1 หน่วย จะมีชื่อเรียกเฉพาะว่า ฟังก์ชันอิมพัลส์หนึ่งหน่วย $\delta(t)$ ที่พบเห็นโดยทั่วไป

5. เมื่อกำหนดให้ $x(t)$ เป็นฟังก์ชันที่มีค่าต่อเนื่องที่เวลา $t = t_0$ แล้วความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณต่อเนื่อง $x(t)$ ดังกล่าวกับสัญญาณอิมพัลส์คือ

$$\int_a^b x(t)\delta(t - t_0) dt = \begin{cases} x(t_0) & ; a < t_0 < b \\ 0 & ; elsewhere \end{cases} \tag{2.16}$$

- 6. สำหรับทุก ๆ ค่าของ a โดยที่ $a \neq 0$ เราจะได้ความสัมพันธ์ที่ว่า $\delta(at) = \delta(t)/|a|$
- 7. ฟังก์ชันอิมพัลส์มีคุณสมบัติการคูณกับฟังก์ชันอื่น ๆ ดังนี้ $f(t)\delta(t - t_0) = f(t_0)\delta(t - t_0)$
- 8. ฟังก์ชันอิมพัลส์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยดังสมการที่ (2.17) และ (2.18)

$$u(t - t_0) = \int_{-\infty}^t \delta(t - t_0) d(t) \tag{2.17}$$

และ
$$\delta(t - t_0) = \frac{d u(t - t_0)}{d t} \tag{2.18}$$

กล่าวคือสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยเป็นสัญญาณที่ได้จากการปริพันธ์สัญญาณอิมพัลส์ดังแสดงในสมการที่ (2.17) และ สัญญาณอิมพัลส์ก็เป็นสัญญาณที่ได้จากการอนุพันธ์สัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยดังแสดงในสมการที่ (2.18)

ตัวอย่างที่ 2.5 จงเขียนโปรแกรมแสดงสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วย $u(t - t_0)$ เมื่อ t_0 มีค่าเท่ากับ 0 วินาที

```
โปรแกรม
impulse=[zeros(1,25) 1 zeros(1,25)]
n=-25:25
step = cumsum(impulse)
stem(n,step,'k')                                     ##
```

ตัวอย่างที่ 2.6 จงเขียนโปรแกรมแสดงสัญญาณอิมพัลส์ $\delta(t - t_0)$ เมื่อ t_0 มีค่าเท่ากับ 0 กับ 25 วินาที

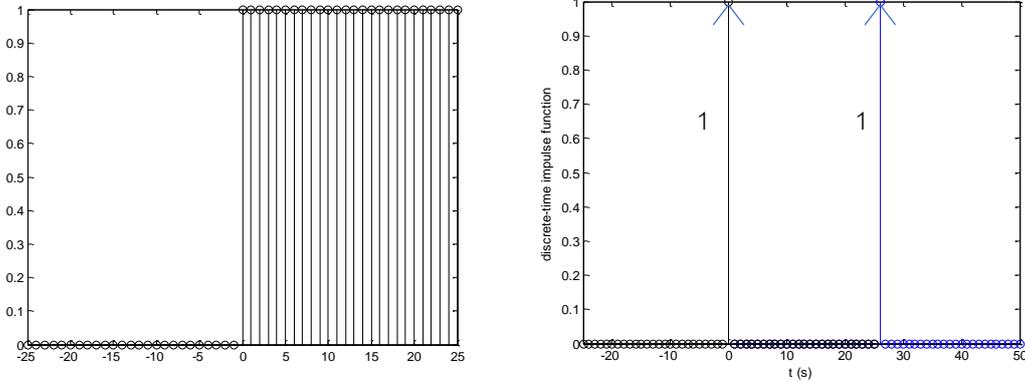
```
โปรแกรม
impulse=[zeros(1,24) 1 zeros(1,25)]
stem(impulse)
hold on
```

t=-25:25

impulse2=[zeros(1,25) 1 zeros(1,25)]

stem(t,impulse2,'k')

##



รูปที่ 2.17 สัญญาณขั้นหนึ่งหน่วย (ตัวอย่าง 2.5) – รุปซ้ำ กับ สัญญาณอิมพัลส์ (ตัวอย่าง 2.6) – รุปขวา

หมายเหตุ ฟังก์ชัน cumsum ถูกนำมาใช้งานเพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองขั้น (step response) ของวงจรแอกคิวมูเลเตอร์ (accumulator) นั้นเป็นสัญญาณแรมป์ (ramp signal) ที่ถูกเลื่อนทางเวลานอกจากนี้ เราอาจจะใช้ฟังก์ชัน diff ของ MATLAB เพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่า “อนุพันธ์อันดับหนึ่งของสัญญาณแรมป์คือสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยและอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสัญญาณขั้นหนึ่งหน่วยคือสัญญาณอิมพัลส์”

2.3 ประเภทของระบบ

ในระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้านั้น ระบบ (system) จะถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณอินพุต $x(t)$ แล้วให้สัญญาณเอาต์พุต $y(t)$ ออกมา ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณทั้งสองในเชิงคณิตศาสตร์นั้น นิยมแสดงด้วยการอาศัยตัวปฏิบัติการ (operator) ดังแสดงในสมการที่ (2.27)

$$y(t) = \alpha\{x(t)\} \tag{2.27}$$

ในที่นี้ α คือตัวปฏิบัติการของระบบ ยกตัวอย่างเช่น ระบบหนึ่งที่พิจารณาเป็นวงจรประวิงสัญญาณ (delay circuit) ที่ประวิงเวลาให้สัญญาณที่เอาต์พุตเกิดช้ากว่าสัญญาณอินพุตเป็นเวลา t_0 วินาที ดังนั้นเราจะเขียนสมการอธิบายตัวปฏิบัติการได้คือ $\alpha\{x(t)\} = Ax(t - t_0)$

ประเภทของระบบที่นิยมนำมาพิจารณาและใช้งานในทางปฏิบัตินี้มีหลายประเภท ดังนี้

2.3.1 ระบบต่อเนื่องเชิงเวลาและระบบไม่ต่อเนื่องเชิงเวลา

สำหรับระบบที่ต่อเนื่องเชิงเวลา (continuous-time system) นั้น สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณที่เกิดจากแหล่งข้อมูลที่เป็นสัญญาณแอนะล็อกหรือสัญญาณดิจิทัลก็ได้ แต่สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากระบบจะเป็นสัญญาณแอนะล็อกเท่านั้น ได้แก่ ระบบการสื่อสารด้วยไฟฟ้าที่อาศัยการกล้าแบบแอนะล็อกและการกล้าแบบดิจิทัล ตามลำดับ

ส่วนระบบไม่ต่อเนื่องเชิงเวลา (discrete-time system) นั้น สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณที่เกิดจากแหล่งข้อมูลที่เป็นสัญญาณแอนะล็อกหรือสัญญาณดิจิทัลก็ได้ แต่สัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากระบบจะเป็นสัญญาณดิจิทัลเท่านั้น ได้แก่ ระบบที่ทำการแปลงจากสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล และการบีบอัด/การขยายข้อมูลดิจิทัล (รวมถึง การเข้ารหัสลับ/การถอดรหัสลับข้อมูลดิจิทัล) ตามลำดับ

2.3.2 ระบบเชิงเส้นและระบบไม่เชิงเส้น

ระบบเชิงเส้น (linear system) คือระบบใด ๆ ที่คุณสมบัติในการทำงานเป็นไปตามสมการที่ (2.28)

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) = \alpha\{x_1(t)\} + \alpha\{x_2(t)\} = \alpha\{x_1(t) + x_2(t)\} \quad (2.28)$$

เมื่อ $x_1(t)$ และ $x_2(t)$ เป็นสัญญาณอินพุตให้กับระบบ α และ $y_1(t)$ และ $y_2(t)$ เป็นสัญญาณเอาต์พุตของระบบ α เมื่อมีสัญญาณอินพุตคือ $x_1(t)$ และ $x_2(t)$ ตามลำดับ นอกจากนี้ จากสมการที่ (2.28) นั้น เราสามารถที่จะพิสูจน์ได้ว่า สำหรับระบบเชิงเส้นใด ๆ ที่มี $y(t) = \alpha\{x(t)\}$ และกำหนดให้ a เป็นค่าคงที่ใด ๆ แล้ว เราจะได้ความสัมพันธ์อีกสมการหนึ่งคือ

$$ay(t) = a\alpha\{x(t)\} = \alpha\{ax(t)\} \quad (2.29)$$

ส่วนระบบไม่เชิงเส้น (nonlinear system) คือระบบที่มีคุณสมบัติหรือเงื่อนไขในการทำงานไม่เป็นไปตามสมการที่ (2.28)

2.3.3 ระบบที่ไม่แปรผันตามเวลาและระบบที่แปรผันตามเวลา

ระบบที่ไม่แปรผันค่าตามเวลา (time-invariant system) คือระบบใด ๆ ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยระบบดังกล่าวนี้จะถูกอธิบายเชิงคณิตศาสตร์ได้ว่า ถ้ากำหนดให้ $y(t) = \alpha\{x(t)\}$ และกำหนดให้ t_0 คือค่าระยะเวลาที่คงที่ค่าหนึ่ง เราจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$y(t - t_0) = \alpha\{x(t - t_0)\} \quad (2.30)$$

ส่วนระบบที่แปรผันตามเวลา (time-varying system) คือระบบที่มีคุณสมบัติหรือเงื่อนไขในการทำงานไม่เป็นไปตามสมการที่ (2.30)

2.3.4 ระบบที่สร้างขึ้นได้และระบบที่สร้างขึ้นไม่ได้

ระบบที่สร้างขึ้นได้หรือระบบคอซัล (realizable system หรือ casual system) คือระบบที่เป็นไปได้ที่จะถูกสร้างขึ้นในทางปฏิบัติ เมื่อพิจารณาสมการทางคณิตศาสตร์และคุณสมบัติเบื้องต้นของระบบ กล่าวคือ เมื่อสัญญาณอินพุต $x(t)$ มีค่าเป็น 0 เมื่อเวลา $t < 0$ แล้ว สัญญาณเอาต์พุตของระบบจะมีคุณสมบัติเป็นไปตามสมการที่ (2.31)

$$y(t) = \alpha\{x(t)\} = 0 \quad ; \quad t < 0 \quad (2.31)$$

ความหมายของสมการที่ (2.31) คือ สัญญาณเอาต์พุตของระบบจะต้องไม่ปรากฏออกมาจากระบบ ตราบเท่าที่ยังไม่มีสัญญาณอินพุตเข้าสู่ระบบ โดยค่าของเอาต์พุตจะเกี่ยวข้องกับค่าของอินพุตที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ผ่านไปแล้วเท่านั้น จะไม่เกี่ยวข้องกับค่าของอินพุตในอนาคตเลย แต่ทั้งนี้ ถ้าระบบใด ๆ มีคุณสมบัติดังกล่าวแล้ว ก็ย่อมมีโอกาสที่จะถูกสร้างขึ้นได้ในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติ อาจจะมีข้อจำกัดแล้วทำให้สร้างขึ้นได้หรือไม่ได้แล้วแต่กรณี ในทางกลับกัน ระบบที่สร้างขึ้นไม่ได้ (unrealizable system หรือ unanticipated system) คือระบบที่มีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามสมการที่ (2.31)

2.4 ผลตอบสนองอิมพัลส์

สำหรับระบบใด ๆ ถ้ามีสัญญาณอิมพัลส์ $\delta(t)$ ถูกป้อนเป็นสัญญาณอินพุตให้แก่ระบบดังกล่าว เราจะได้สัญญาณเอาต์พุต $y(t)$ หรือผลตอบสนองของระบบ $h(t)$ ที่ถูกเรียกว่า **ผลตอบสนองอิมพัลส์ (impulse response) ของระบบ** ดังนั้น จากสมการที่ (2.27) เราจะเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2.32)

$$h(t) = \alpha\{\delta(t)\} \quad (2.32)$$

โดยผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบนี้ใช้บอกคุณสมบัติของระบบนั้น ๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราพิจารณาระบบเชิงเส้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ค่าสัญญาณเอาต์พุตของระบบที่เกิดขึ้นจากสัญญาณอินพุตใด ๆ นั้นจะสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.33)

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} x(t-\tau)h(\tau)d\tau \quad (2.33)$$

การหาปริพันธ์ตามที่ปรากฏในสมการที่ (2.33) นั้น มีชื่อเรียกเฉพาะว่า **การคอนโวลูชัน** ซึ่งเป็นการคอนโวลูชันระหว่างสัญญาณอินพุต $x(t)$ กับผลตอบสนองของระบบ $h(t)$ แสดงในสมการที่ (2.34)

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) = h(t) \otimes x(t) \quad (2.34)$$

2.5 ระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรผันตามเวลาและที่ต่อเนื่องทางเวลา

ระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรผันตามเวลา (linear time-invariant system หรือ ระบบ LTI) คือระบบที่มีคุณสมบัติทั้งเชิงเส้นและไม่แปรผันตามเวลา ในทางปฏิบัติ ระบบ LTI นิยมนำมาใช้ในการตั้งสมมติฐานของการทำงานเพื่อศึกษาและหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของระบบใด ๆ ทั้งนี้ การเข้าใจระบบ LTI จึงช่วยให้สามารถวิเคราะห์สัญญาณและระบบได้ง่ายขึ้น ก็เพราะว่าระบบ LTI นั้นมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ สัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับผลลัพธ์ที่เกิดจากการคอนโวลูชันระหว่างสัญญาณอินพุตและผลตอบสนองอิมพัลส์ (impulse response) ของระบบ (ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.4 ที่ผ่านมา) ดังนั้น ถ้าเราทราบผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ LTI ก็จะทำให้เราสามารถคำนวณหาสัญญาณเอาต์พุตของระบบนั้น ๆ ได้

สำหรับระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรผันตามเวลาและที่ต่อเนื่องทางเวลา (continuous-time LTI system) นั้น หมายถึง ระบบ LTI ใด ๆ ที่มีสัญญาณอินพุต ผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ และสัญญาณเอาต์พุต ล้วนแล้วแต่เป็นสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา ในการศึกษาและการแก้ปัญหาเกี่ยวกับระบบการสื่อสารด้วยสัญญาณไฟฟ้านั้น เรามักจะต้องพิจารณาและใช้งานสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาอยู่เสมอ ดังนั้น จึงมีการศึกษาและนำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แสดงสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา โดยได้นิยามไว้ว่า “สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลานั้นสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากการทับซ้อน (superposition) ของสัญญาณอิมพัลส์ $\delta(t)$ จำนวนมากที่ถูกสเกลและถูกเลื่อนทางเวลา” ดังแสดงในรูปของสมการที่ (2.35)

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\delta(t-\tau)d\tau \quad (2.35)$$

นอกจากนี้ เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณอิมพัลส์และกำหนดให้ $h(t)$ เป็นผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ LTI ที่ต่อเนื่องทางเวลา (สัญลักษณ์คือ T) เราจะได้สัญญาณเอาต์พุตของระบบเป็นไปตามสมการที่ (2.36)

$$h(t) = T[\delta(t)] \quad (2.36)$$

ดังนั้น ในกรณีที่สัญญาณอินพุตคือ $x(t)$ เราจะได้สัญญาณเอาต์พุตหรือผลตอบสนองของระบบมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (2.37)

$$y(t) = T[x(t)] \quad (2.37)$$

แทนค่า $x(t)$ จากสมการที่ (2.35) ลงในสมการที่ (2.37) จะได้ว่า

$$y(t) = T\left[\int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\delta(t-\tau)d\tau\right] = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)T[\delta(t-\tau)]d\tau \quad (2.38)$$

และเนื่องจากระบบที่พิจารณานี้เป็นระบบ LTI ดังนั้น $h(t-\tau) = T[\delta(t-\tau)]$ ทำการแทนค่าความสัมพันธ์นี้ลงในสมการที่ (2.38) เราจะได้

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (2.39)$$

สมการที่ (2.39) นี้ถูกเรียกกันโดยทั่วไปว่า “ปริพันธ์คอนโวลูชัน” หรือก็คือ การคอนโวลูชันที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่แล้วนั่นเอง ซึ่งเราจะพบว่าเป็นการหาค่าปริพันธ์ของฟังก์ชัน $x(\tau)h(t-\tau)$ สำหรับทุก ๆ ค่าของ τ ซึ่งอาจจะพิจารณาว่า $h(t-\tau)$ คือสัญญาณ $h(\tau)$ ที่ถูกพับสัญญาณแล้วถูก

ช่วงเวลาไปแล้ว t หน่วย นอกจากนี้ สมการที่ (2.39) ยังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ที่ปรากฏในสมการที่ (2.40) ได้ดังนี้

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (2.40)$$

เมื่อ \otimes แทนตัวดำเนินการคอนโวลูชัน สำหรับระบบ LTI ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา การคอนโวลูชันของสัญญาณไม่ต่อเนื่องทางเวลาก็ถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าสัญญาณเอาต์พุตของระบบ LTI เช่นกัน โดยทำการหาผลรวมทั้งหมดของผลคูณระหว่างสัญญาณอินพุต $x[n]$ กับผลตอบสนองอิมพัลส์ $h[n]$ ดังแสดงในสมการที่ (2.41)

$$y[n] = x[n] \otimes h[n] = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x[i]h[n-i] = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h[i]x[n-i] \quad (2.41)$$

ในทางปฏิบัติ ระบบ LTI สามารถถูกอธิบายได้อย่างสมบูรณ์ด้วยผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ $h(t)$ มีค่าเท่ากับสัญญาณเอาต์พุต $y(t)$ เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไคร้กเดลตา $x(t) = \delta(t)$ เท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ (2.42)

$$y(t) = \delta(t) \otimes h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau)h(t-\tau)d\tau = h(t) \quad (2.42)$$

โดยทั่วไป ผลตอบสนองอิมพัลส์ $h(t)$ มีค่าเป็นอะไรก็ได้ แต่ถ้าผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบมีค่าเท่ากับศูนย์ ณ เวลา $t < 0$ ดังแสดงในสมการที่ (2.43)

$$h(t) = 0 \quad ; \quad t < 0 \quad (2.43)$$

จากกรณีนี้ จะพบว่า ระบบมีคุณสมบัติคอซอลิตี (causality property) หมายถึงว่า ผลตอบสนองของระบบ ณ เวลาในปัจจุบันขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตที่ได้รับในปัจจุบันหรือจากในอดีตเท่านั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตในอนาคต ดังนั้น ถ้าระบบใด ๆ ก็ตามที่มีลักษณะการตอบสนองแบบเรียลไทม์ (real time) แล้ว ระบบนั้นจะต้องมีคุณสมบัติคอซอลิตีเสมอ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ระบบการสื่อสารส่วนใหญ่ในทางปฏิบัติมักจะตั้งสมมติฐานว่าระบบดังกล่าวเป็นแบบ LTI เพื่อให้ง่ายต่อการทำงานและการวิเคราะห์ข้อมูล เพราะระบบดังกล่าวสามารถที่จะถูกอธิบายได้อย่างสมบูรณ์ด้วยผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ อีกทั้ง สัญญาณเอาต์พุตของระบบก็เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการทำคอนโวลูชันระหว่างสัญญาณอินพุตกับผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ

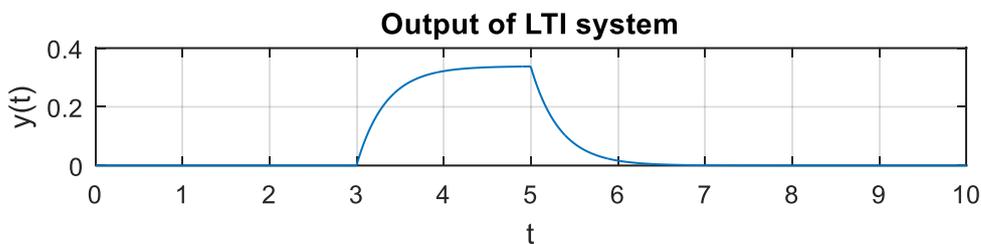
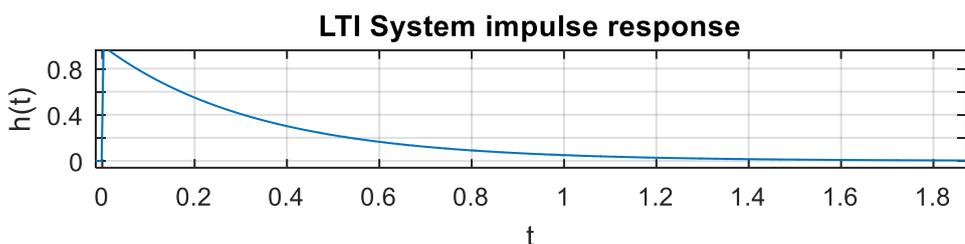
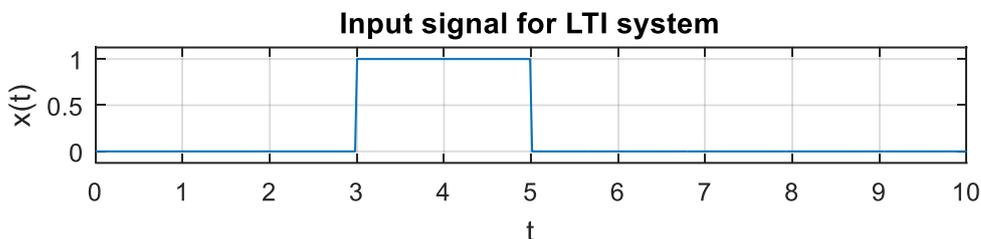
ตัวอย่างที่ 2.7 จงเขียนโปรแกรมเพื่อวาดรูปสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการคอนโวลูชัน (สัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา) สำหรับระบบ LTI ที่ป้อนสัญญาณอินพุต $x(t)=u(t-3)-u(t-5)$ และ ผลตอบสนองอิมพัลส์ระบบ $h(t)=u(t)\exp(-3t)$ ในที่นี้ เราจะใช้ฟังก์ชัน convolution integral ของโปรแกรม MATLAB

วิธีทำ

โปรแกรม MATLAB ที่เขียนขึ้นมาเพื่อหาค่าการคอนโวลูชันของสัญญาณ

```
clc;
clear all;
close all;
syms t tau % Short-cut for constructing symbolic objects.
x = heaviside(t-3)-heaviside(t-5); % input signal to the LTI system
h = exp(-3*t)*heaviside(t); % system's impulse response
y=int(subs(x,tau)*subs(h,t-tau),tau,0,t);
disp('The output of the convolution integral is');
disp(y);
subplot(3,1,1);
ezplot(x,[0,10]);
title('Input signal for LTI system');
xlabel('t')
ylabel('x(t)')
grid;
subplot(3,1,2);
ezplot(h);
title('LTI System impulse response');
xlabel('t')
ylabel('h(t)')
grid;
ti = 0;
tf = 10;
N = 1000;
dt = (tf-ti)/N;
t = ti:dt:tf;
x = heaviside(t-3)-heaviside(t-5);
x = x*dt;
if t >= 0
h = exp(-3*t);
else
h=0;
end
y1=conv(x,h);
subplot(3,1,3);
plot(t, y1 (1: length (t)));
title('Output of LTI system');
```

```
xlabel('t')
ylabel('y(t)')
grid;                                     ##
```



รูปที่ 2.18 รูปสัญญาณที่ได้จากการรันโปรแกรม MATLAB ของตัวอย่างที่ 2.7

ตัวอย่างที่ 2.8 จงเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อแสดงค่าสัญญาณเอาต์พุต $y[n]$ ของระบบ LTI เมื่อ กำหนดให้สัญญาณอินพุต $x[n] = \{4, 1, 2, 5\}$ และผลตอบสนองอิมพัลส์ $h[n] = \{1, 2, -1\}$

วิธีทำ อ้างอิงสมการของการหาค่าสัญญาณเอาต์พุต $y[n] = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x[i]h[n-i]$

ตำแหน่ง $n =$	-1	0	1	2	3
ค่า $h[n]$	1	2	-1		
ค่า $x[n]$		4	1	2	5
เทอมแรก คือ $n = 0 \Rightarrow y[0] = x[0]h[n]$	4	8	-4		
เทอมที่ 2 คือ $n = 1 \Rightarrow y[1] = x[1]h[n-1]$		1	2	-1	
เทอมที่ 3 คือ $n = 2 \Rightarrow y[2] = x[2]h[n-2]$			2	4	-2
เทอมที่ 4 คือ $n = 3 \Rightarrow y[3] = x[3]h[n-3]$				5	10
หาผลรวมของทั้ง 4 เทอม เราจะได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้	4	9	0	8	8
					-5

การใช้ฟังก์ชัน conv ของโปรแกรม MATLAB ในการหาค่าคอนโวลูชันสำหรับ discrete time signal

$x = [4 \quad 1 \quad 2 \quad 5];$

$h = [1 \quad 2 \quad -1];$